

# **CANVIS HIDROLÒGICS I MORFOLÒGICS AL TRAM BAIX DE LA NOGUERA RIBAGORÇANA**



**Antoni Granés González**

**Grau en Geografia i Ordenació del Territori**

**Universitat de Lleida**

Treball de fi de Grau

Tutor: Damià Vericat Querol

(curs 2016-2017)

## Resum

Els embassaments generen una sèrie de canvis molt importants aigües avall a causa de què les preses aturen la circulació dels sediments i també modifica la freqüència i les magnituds de les crescudes o avingudes i, per tant, ocasiona un canvi important en les condicions d'equilibri dels riu que acaba afectant a la morfologia fluvial.

En aquest treball s'analitzen els canvis hidrològics i morfològics al tram baix del riu Noguera Ribagorçana des de l'any 1945 fins a l'actualitat. De manera específica, en aquest treball s'analitzen els canvis que s'han produït des de la construcció de l'embassament de Santa Ana en un tram de cinc quilòmetres aigües avall.

Per a la realització d'aquest treball s'han analitzat sèries de cabals mensuals i anuals disponibles per a l'estació d'aforament de Pinyana, la qual cosa permet analitzar els canvis hidrològics i del règim de crescudes. Per altra banda, per estudiar els canvis morfològics s'ha elaborat una sèrie de cartografia morfològica a partir de set ortofotomapes que cobreixen el període que transcorre des dels anys 1945 fins l'actualitat. L'estudi evolutiu de les diferents unitats morfològiques cartografiades permet analitzar l'ajust del tram fluvial analitzat a causa de la reducció de la carga sedimentària i als canvis en la freqüència i magnitud de les riuades.

Els resultats d'aquest treball final de grau indiquen que la freqüència i magnitud de les riuades aigües avall de la presa de Santa Ana han estat reduïdes significativament. Les crescudes més freqüents, períodes de retorn de 2 anys s'han reduït un 61,9%, mentre que les riuades menys freqüents, les associades a un període de retorn de 25 anys, s'han reduït un 57,3%. El règim de cabals també ha estat modificat. El cabal mitjà diari s'ha reduït un 28,2% (de 21 m<sup>3</sup>/s a 15,1 m<sup>3</sup>/s) a partir de la posada en funcionament de la presa. A nivell mensual, la gestió de l'embassament ha fet que el règim del riu canviï d'un règim nivopluvial (màxims a la primavera i la tardor) amb una amplitud de cabals de 17 m<sup>3</sup>/s (diferència entre el mes amb més cabal i el mes amb menys cabal), a un règim molt menys variable, amb poca amplitud en els cabals mitjans (8 m<sup>3</sup>/s), influenciat per la disponibilitat d'aigua i les demandes de cabals aigües avall. A

nivell morfològic, els resultats indiquen una forta reducció de l'àrea activa de la llera i una simplificació en el nombre de canals, amb la qual cosa la vegetació de ribera ha anat guanyat terreny progressivament, colonitzant les àrees antigament actives. A mode d'exemple, la reducció de l'àrea considerada plana d'inundació ha estat del 72,4% a més, part de les àrees actives han passat a ser camps de cultiu o han estat estabilitzades permanentment per la vegetació de ribera. En l'actualitat es presenta un tram del riu molt estabilitzat com a resultat no sols dels impactes directes de la presa de Santa Anna, sinó també d'altres impactes directes a la llera com per exemple les extraccions d'àrids i les canalitzacions, i altres impactes a escala de conca com la regulació aigües amunt i els canvis en els usos del sòl.

**Paraules clau:** embassaments, crescudes, sediments, morfologia fluvial, riu Noguera Ribagorçana, llera, canvis, estabilització

**Abstract**

Dams cause a number of impacts downstream since they alter flow regimes, and in particular the magnitude and frequency of floods, and they retain the majority of sediment transported from upstream. Therefore, impoundments cause a significant change in the equilibrium condition of a fluvial system that ends up affecting river morphology.

This project analyses hydrological and morphological changes in the lower Noguera Ribagorçana from 1945 to the present. Specifically, the paper analyses the changes that have occurred since the construction of the dam of Santa Ana on a river reach of five kilometres downstream.

For the realization of this project we have analysed monthly and annual flows series available for the official gauging station of Pinyana. These series allow analysing the impacts of dams on the hydrological and flood regimes. Moreover, a series of maps were elaborated based on the interpretation of seven orthophotomaps covering the period which runs from 1945 to the present. A total of five morphological units were identified and drawn. Subsequently, their extension was compared between periods in order to analyse morphological adjustment due to the reduction of sediment load and changes in the frequency and magnitude of floods.

Results indicate that the frequency and magnitude of floods downstream from the dam of Santa Ana have been reduced significantly. Floods associated to more frequent return periods (two years) have decreased by 61.9%, while less frequent floods, those associated with a return period of 25 years, have been reduced by 57.3%. Annual flows have also been modified. Annual mean discharge has been reduced by 28.2% (from 21 m<sup>3</sup>/s to 15.1 m<sup>3</sup>/s) after the commissioning of the dam. Monthly, the management of the dam controls the river regime; it changes from a nivo-pluvial regime (maximum in spring and autumn) with a flow amplitude of 17 m<sup>3</sup>/s (difference between the month with the maximum and minimum flow), to a more stable regime through the year with a lower amplitude (8 m<sup>3</sup>/s). This later monthly regime is influenced by water availability and demand downstream. Morphologically, our results indicate a significant reduction in the active channel area together with a simplification of the number of channels. Additionally, the



vegetation has occupied areas previously active. As an example, the area considered flood plain has been reduced by 72.4%, while part of the active areas have been occupied by agricultural activities or have become permanently stabilized due to vegetation encroachment. The Noguera Ribagorçana presents a very stable situation (minimum dynamism and bed perturbations) as a result not only of the direct impacts of the dam of Santa Anna, but also other direct impacts on the river bed such as in-channel gravel mining and embankments, and other impacts at a catchment scale as the upstream regulation and changes in land use.

**Keywords:** reservoirs, floods, sediment, river morphology, river Noguera Ribagorçana, channel changes, stabilization

## Índex

1. INTRODUCCIÓ .....	12
1.1. Transferència d'aigua i sediments en sistemes fluvials .....	12
1.2. La regulació fluvial: els embassaments .....	15
1.2.1. Canvis hidrològics aigües avall dels embassaments .....	15
1.2.2. Captura del sediment per les preses .....	16
1.3. Objectiu i hipòtesis .....	20
2. ÀREA D'ESTUDI .....	21
2.1. La conca de la Noguera Ribagorçana (climatologia, geologia hidrologia, regulació, usos del sòl i vegetació) .....	21
2.1.1. Descripció .....	21
2.1.2. Climatologia .....	23
2.1.3. Geologia .....	24
2.1.4. Hidrologia i regulació .....	26
2.1.5. Usos del sòl .....	27
2.1.6. Vegetació .....	29
2.2. El tram baix de la Noguera Ribagorçana .....	31
3. MÈTODES.....	38
3.1. Informació disponible .....	38
3.1.1. Dades de cabal .....	39
3.1.2. Fotografies aèries .....	40
3.2. Tractament de la informació.....	43
3.2.1. Neteja de dades de cabal .....	43
3.2.2. Anàlisis hidrològics .....	46
3.2.3. Georeferenciació de fotogrames històrics.....	47
3.2.4. Cartografia d'unitats morfològiques .....	51
3.3. Càlculs d'índexs de complexitat morfològica .....	58
4. RESULTATS I DISCUSSIÓ.....	59

4.1. Canvis Hidrològics .....	59
4.1.1. Canvis en el règim de cabals mensuals i anuals .....	59
4.1.2. Canvis en la freqüència i magnitud de les riudes.....	64
4.2. Canvis morfològics .....	75
4.2.1. Canvis en la superfície de la llera .....	86
4.2.2. Canvis en la superfície de l'àrea activa de la llera .....	88
4.2.3. Canvis en la superfície de l'àrea de la plana d'inundació .....	90
4.2.4. Reducció de la complexitat morfològica (multiplicitat).....	92
5. CONCLUSIONS I RECOMANACIONS PER A TREBALLS FUTURS.....	97
Agraïments.....	100
Bibliografia .....	101

## Índex de figures

<b>Figura 1:</b> Fotografies aèries dels anys 1978, 1981 i 1987 del riu Noguera Ribagorçana que mostren els efectes de les extraccions d'àrids en la dinàmica fluvial. Font: Fotografies 1978 i 1981: IGN. Fotografia 1987: ICGC. ....	18
<b>Figura 2:</b> Tram sense l'efecte d'hidro-puntes al riu Esca a Isaba (Navarra). Font: Saih Ebro.....	19
<b>Figura 3:</b> Tram amb l'efecte d'hidro-puntes al riu Noguera Pallaresa a Escaló (Lleida). Font: Saih Ebro. ....	19
<b>Figura 4:</b> Localització de la conca de la Noguera Ribagorçana i de les seves principals subconques. Elaboració pròpia mitjançant el MDT del Instituto Geográfico Nacional (IGN) i del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA).....	22
<b>Figura 5:</b> Distribució de la geologia de la Conca del Noguera Ribagorçana. Elaboració pròpia mitjançant el Mapa Geològic de Catalunya i del Mapa Litológico de Aragón.....	25
<b>Figura 6:</b> Distribució dels usos del sòl a la conca de la Noguera Ribagorçana. Elaboració pròpia mitjançant el Mapa Forestal d'Espanya del Ministerio de Agricultura, Alimentación i Medio Ambiente (MAPAMA). ....	28
<b>Figura 7:</b> Distribució de la vegetació a la conca de la Noguera Ribagorçana. Elaboració pròpia mitjançant el Mapa Forestal d'Espanya del Ministerio de Agricultura, Alimentación i Medio Ambiente (MAPAMA). ....	30
<b>Figura 8:</b> Localització de l'àrea d'estudi dins de la conca de la Noguera Ribagorçana. Elaboració pròpia mitjançant el MDT i el Mapa Topográfico Nacional del Instituto Geográfico Nacional (IGN). ....	31
<b>Figura 9:</b> Embassament de Santa Ana. Font: Fotografia pròpia.....	32
<b>Figura 10:</b> Riu Noguera Ribagorçana amb la llera estabilitzada amb mostres de vegetació dins de la plana d'inundació, pròxim al municipi d'Ibars de Noguera. En aquesta foto i en altres es pot veure la mota que es va construir en el marc del projecte i buidatge de l'embassament que ha tingut un impacte directe sobre la plana d'inundació i altres unitats morfològiques. Font: A. Palau, 1991.....	34
<b>Figura 11:</b> Plana d'inundació del riu Noguera Ribagorçana amb mostres de graves, còdols i vegetació. Font: A. Palau, 1991.....	34

<b>Figura 12:</b> Exemple d'intrusió de la vegetació en la llera del riu Noguera Ribagorçana. Aquest tram indica una gran estabilitat de la llera. Font: A. Palau, 1991. ....	35
<b>Figura 13:</b> Riu Noguera Ribagorçana just després de l'assut de derivació del canal de Pinyana l'any 1991. Font: A. Palau, 1991. ....	35
<b>Figura 14:</b> Riu Noguera Ribagorçana just després de l'assut de derivació del canal de Pinyana l'any 2017. S'observa com la vegetació a guanyat en extensió: Font: Fotografia pròpia. ....	36
<b>Figura 15:</b> Estació d'aforament de Pinyana. Font: Fotografia pròpia. ....	40
<b>Figura 16:</b> Recta de regressió dels Qci i Qc. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades extretes del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. ....	45
<b>Figura 17:</b> Fotografia aèria de l'any 1981 on es poden veure una sèrie de punts de control. Font: Base cartogràfica ICGC. ....	48
<b>Figura 18:</b> Ortofoto de l'any 2015 on es poden veure una sèrie de punts de control, els mateixos que els visualitzats per a la fotografia georeferenciar. Font: Base cartogràfica ICGC. ....	49
<b>Figura 19:</b> Taula on es mostra el RMS Error sense corregir. ....	49
<b>Figura 20:</b> Taula on es mostra el RMS Error corregir després de fer l' <i>adjust.</i> .	50
<b>Figura 21:</b> Ortofoto de l'any 2015. Font: Base cartogràfica del ICGC. ....	52
<b>Figura 22:</b> Llera del riu Noguera Ribagorçana. Font: Fotografia pròpia. ....	52
<b>Figura 23:</b> Ortofoto de l'any 1945. Font: Base cartogràfica del ICGC. ....	53
<b>Figura 24:</b> Ortofoto de l'any 2015. Font: Base cartogràfica del ICGC. ....	54
<b>Figura 25:</b> Àrea activa parcialment vegetada del riu Noguera Ribagorçana. Font: Fotografia pròpia. ....	54
<b>Figura 26:</b> Ortofoto de l'any 2015. Font: Base cartogràfica del ICGC. ....	55
<b>Figura 27:</b> Illes de vegetació del riu Noguera Ribagorçana. Font: Fotografia pròpia. ....	55
<b>Figura 28:</b> Ortofoto de l'any 2015. Font: Base cartogràfica del ICGC. ....	56
<b>Figura 29:</b> Plana d'inundació del riu Noguera Ribagorçana. Font: Fotografia pròpia. ....	56
<b>Figura 30:</b> Tram d'estudi fragmentat en 4 trams. Font: Base cartogràfica del ICGC. ....	57
<b>Figura 31:</b> Exemple de l'índex de multiplicitat en el tram d'estudi. Font: Elaboració pròpia. ....	58

<b>Figura 32:</b> Cabal mitjà anual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX.....	59
<b>Figura 33:</b> Cabal mitjà mesual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX.....	61
<b>Figura 34:</b> Aportació hídrica anual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX.....	62
<b>Figura 35:</b> Aportació hídrica mensual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX. ....	63
<b>Figura 36:</b> Cabal màxim instantani diari anual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX.....	64
<b>Figura 37:</b> Cabal màxim instantani mensual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX.....	65
<b>Figura 38:</b> Cabal mitjà diari màxim anual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX. ....	66
<b>Figura 39:</b> Cabal mitjà màxim mensual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX. ....	67
<b>Figura 40:</b> Distribució de Gumbel. Font: Elaboració pròpia. ....	74
<b>Figura 41:</b> Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 1945. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC. ....	76
<b>Figura 42:</b> Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 1956. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC. ....	77
<b>Figura 43:</b> Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 1981. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del IGN.....	78
<b>Figura 44:</b> Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 1987. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC. ....	79
<b>Figura 45:</b> Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 1996. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC. ....	80

<b>Figura 46:</b> Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 2002. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC. ....	81
<b>Figura 47:</b> Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 2010. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC. ....	82
<b>Figura 48:</b> Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 2015. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC. ....	83
<b>Figura 49:</b> Evolució morfològica del conjunt del tram d'estudi al llarg del període analitzat. Font: Elaboració pròpia .....	84
<b>Figura 50:</b> Reducció de l'àrea activa sense vegetació entre els anys 1945 i 2015. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC.....	85
<b>Figura 51:</b> Canvis en la superfície de la llera. Font: Elaboració pròpia.....	86
<b>Figura 52:</b> Canvis en la superfície de l'àrea activa sense vegetació i en l'àrea activa parcialment vegetada. Font: Elaboració pròpia.....	88
<b>Figura 53:</b> Canvis en la superfície de l'àrea de la plana d'inundació. Font: Elaboració pròpia. ....	91
<b>Figura 54:</b> Índex de multiplicitat de canals dels anys 1945-2015. Font: Elaboració pròpia. ....	95
<b>Figura 55:</b> Comparació de l'Índex de multiplicitat de canals de l'any 1945 i 2015. Font: Elaboració pròpia. ....	96

### Índex de taules

<b>Taula 1:</b> Valors mitjans anuals de l'estació meteorològica automàtica de Santa Ana (EM52), per a l'any 2016. Font: Saih Ebro .....	24
<b>Taula 2:</b> Dades dels Qci i Qc per poder elaborar l'estimació de cabals. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades extretes de Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. ....	44
<b>Taula 3:</b> Exemple de càlculs. Elaboració pròpia. ....	45
<b>Taula 4:</b> Període 1947-2013. Font: Elaboració pròpia. ....	68
<b>Taula 5:</b> Període 1947–1962. Font: Elaboració pròpia.....	70
<b>Taula 6:</b> Període 1962–2013. Font: Elaboració pròpia.....	71
<b>Taula 7:</b> Períodes de retorn del cabals amb la llei de Gumbel. Font: Elaboració pròpia. ....	73
<b>Taula 8:</b> Evolució de la llera al tram baix del riu Noguera Ribagorçana. Font: Elaboració pròpia a partir de la cartografia que es presenta en les figures 41-48. ....	87
<b>Taula 9:</b> Evolució de l'àrea activa sense vegetació al tram baix del riu Noguera Ribagorçana. Font: Elaboració pròpia a partir de la cartografia que es presenta en les figures 41-48.....	89
<b>Taula 10:</b> Evolució de l'àrea activa parcialment vegetada al tram baix del riu Noguera Ribagorçana. Font: Elaboració pròpia a partir de la cartografia que es presenta en les figures 41-18. ....	89
<b>Taula 11:</b> Evolució de la plana d'inundació al tram baix del riu Noguera Ribagorçana. Font: Elaboració pròpia a partir de la cartografia que es presenta en les figures 41-48.....	92



## 1. INTRODUCCIÓ

### 1.1. Transferència d'aigua i sediments en sistemes fluvials

Un riu és un sistema natural complex i dinàmic en el temps i l'espai, on la transferència d'aigua i sediments succeeix al llarg d'un continu fluvial des de les zones de capçalera més elevades fins a la desembocadura que hi ha a nivell del mar. Així doncs, l'equilibri entre els processos d'erosió, transport i sedimentació són els responsables del tipus de morfologia fluvial (Vericat i Batalla, 2006). El règim hidrològic i de crescudes, el transport de sediments i la biota<sup>1</sup>, interactuen alhora de modelar la morfologia fluvial. Per tant, dins d'aquest context, durant el transcurs del riu, podem identificar diferents tipus de zones fluvials en relació amb els principals processos que s'hi donen (Schumm, 1977):

1. **Zona de producció de sediments o conca de drenatge:** és on actuen els processos erosius causats per fenòmens com la precipitació, característiques del sòl (porositat, capacitat d'infiltració de l'aigua, impermeabilitat etc., el vent, la temperatura, etc.
2. **Zona de transferència o transport de sediments:** és on hi ha l'equilibri entre la capacitat de transport del riu i en la transferència dels sediments.
3. **Zona de sedimentació:** és on els sediments es van depositant a causa de la pèrdua de capacitat de transport del riu, això, bàsicament succeeix a la zona de la desembocadura.

Un tram del riu que està en condicions naturals tendeix a mantenir la morfologia en equilibri dinàmic, ja que la quantitat de sediments exportats des d'un sector determinat és molt similar a la procedent des d'aigües amunt (Williams i Wolman, 1984). La morfologia de la llera d'un riu està definida pel pendent, la geometria i la forma en planta. En quan a la forma en planta, hi destaquen les següents tipologies (Miall, 1977 i Rust, 1978):

---

<sup>1</sup> Conjunt de tots els éssers vius d'una àrea determinada (Diccionari de geografia física, 2003).

- **Canal rectilini**

- En general solen ser molt poc comuns. Són influenciats per valls molt estables i amb condicionants tectònics que dificulten la seva mobilitat.
- Migració de la llera, canvis.
- Valors de sinuositat<sup>2</sup> superiors a 1.1 però inferiors a 1.5



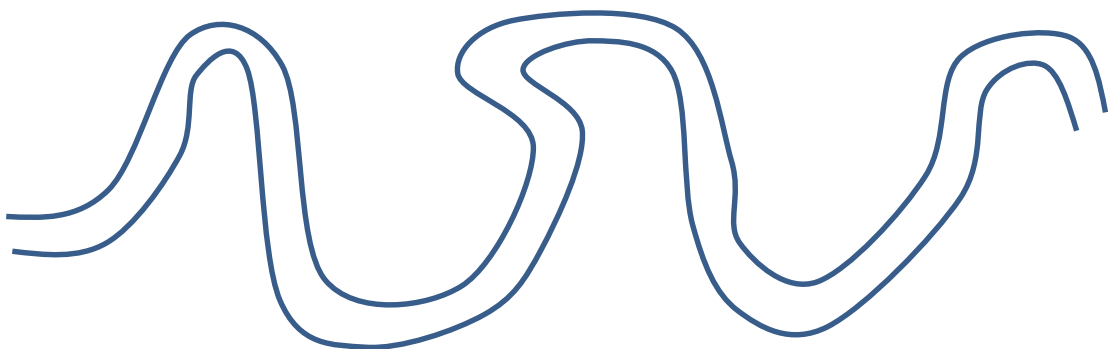
- **Canal sinuós**

- Presenten barres laterals i centrals.
- Unitats associades a confluències tributaris en les pròpies confluències o aigües avall.



- **Canal meandriforme**

- Canvi en la forma dels meandres.
- Presenten barres de meandre i barres centrals.
- Poc desnivell.
- Altra sinuositat, valors de més de 1.5.

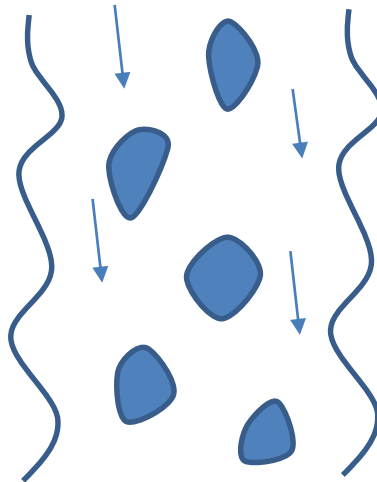


---

<sup>2</sup> El desenvolupament de meandres existents en la llera principal d'un riu, i el seu càlcul s'obté posant en relació la longitud del canal amb la longitud màxima de la vall que configura (Schumm, 1963).

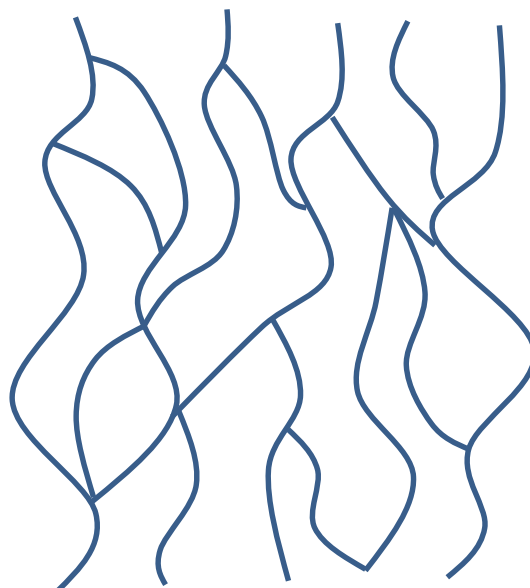
- **Canal trenat (*braided*)**

- Rius molt dinàmics amb canvis ràpids en la forma de la llera.
- Molts obstacles i barreres (barres, troncs) que dificulten els canals.
- Molt transport de sediments.
- Alta erosionabilitat de la llera i marges.
- Elevat gradient i, per tant, més capacitat per assolir llimars de mobilitat.
- Cabal molt variable.



- **Canal anastomosant**

- Llit ample i poc profund.
- Xarxa de canals entrelaçats separats per barres vegetades.
- Rius amb molt de cabal.



## **1.2. La regulació fluvial: els embassaments**

### **1.2.1. Canvis hidrològics aigües avall dels embassaments**

La construcció d'un embassament provoca una ruptura en la continuïtat fluvial del riu. Les preses modifiquen la transferència d'aigua i sediments, fet que comporta un canvi important en les condicions d'equilibri dels rius. Com a conseqüència d'això es generen uns canvis en els processos fluvials aigües avall.

Els canvis hidrològics aigües avall dels embassaments estan relacionats amb les característiques d'aquests (la seva grandària) en relació amb l'aportació hídrica de la conca, amb la gestió de la presa i amb els usos de l'aigua que s'hi emmagatzema. Segons com estigui gestionat afectarà en major o menor mesura la dinàmica fluvial aigües avall.

Si parlem dels canvis que es produeixen aigües avall de l'embassament, un dels més importants és que el règim de cabals i de crescudes es veu bastant alterat. Quan això succeeix vol dir que hi ha una major regulació del cabal del riu (Vericat i Batalla, 2004). Aquests canvis modifiquen els processos físics i ecològics, entre ells, el transport de sediments, la morfologia fluvial i l'intercanvi de nutrients fonamentals per a la dinàmica fluvial (Poff et al. 1997).

Segons els estudis de Vericat i Batalla (2004), la magnitud de les avingudes de cabal de 25 anys de període de retorn, a Flix-Ascó s'han reduït un 13%, mentre que a Tortosa ja no es veuen afectades per la regulació. No obstant això, si en el càlcul es té en compte les avingudes històriques de l'any 1907 i 1937 la reducció de les avingudes  $Q_{25}$  a Tortosa arriba a una mitjana del 35%.

L'estudi de López Moreno i García Ruiz (2003), mostra com els embassaments destinats a proporcionar aigua pel regadiu (Yesa i La Peña, i Santa Ana en menor mesura) emmagatzemen aigua durant un llarg període (octubre-maig). D'aquesta manera disposen del màxim volum d'aigua emmagatzemada, a finals de l'estació humida i principis de la seca (estiu), quan tenen que proporcionar els majors cabals possibles a les àrees de regadiu (juny-setembre). Aquest és un bon exemple de la modificació dels cabals mensuals segons les demandes, en aquests cas agrícoles.

Cal esmentar també que les preses retenen bona part de la carga sedimentària que es transporta d'aigües amunt Segons Batalla et al. (2008), el riu Ebre aigües avall de Flix transporta una càrrega sedimentària notablement inferior a la estimada per a principis del segle XX, ja que els embassaments del tram baix retenen fins a un 90% de la càrrega de llims i argiles ( $1,4 \times 10^6$  t/any), el que provoca que la concentració de sediments en suspensió aigües avall de les preses disminueixi fins un orde de magnitud. Així, l'aigua neta o *hungry water* (Kondolf, 1997) alliberada per les preses pot generar processos d'erosió a la llera. Tot i que hagiavingudes de cabal alliberades periòdicament per la presa, que permeten erosionar el riu, aportaran poc sediment i el riu entrarà en una fase de desequilibri com a conseqüència del dèficit sedimentari. Per tant, els principals efectes sobre la dinàmica fluvial seran els següents (Vericat i Batalla, 2004):

- La degradació dels ecosistemes fluvials i deltaics.
- La incisió per erosió de la llera amb impactes sobre l'estabilitat de les infraestructures.
- La disminució de l'amplada de la llera i, per tant, la reducció de les àrees actives, amb el que comporta l'estabilitat de la llera.
- La colonització per la vegetació de ribera de les àrees anteriorment actives, cosa que produeix la intrusió d'espècies exòtiques.

Malgrat tot, els embassaments són necessaris per a nosaltres, ja que garanteixen les reserves d'aigua per a usos quotidians, industrials, agrícoles etc., també ajuden en la protecció contra les inundacions ja que poden laminar el cabal d'avingudes extraordinàries. A més a més són fonts d'energia renovable.

### **1.2.2. Captura del sediment per les preses**

Els rius transporten els sediments d'una manera continua des de la capçalera fins a la desembocadura, però les preses provoquen un tall al continu fluvial del riu insuperable pels sediments i, per tant, els sediments queden emmagatzemats a l'embassament (Kondolf, 1997), ja que els embassaments retenen la totalitat del material que és transportat com a càrrega de fons (sorres, graves i cants) i, també, gran part del sediment en suspensió (argiles, llims i sorres) (Vericat i

Batalla, 2004). Això provoca greus alteracions en els ecosistemes fluvials i costers, com a conseqüència del dèficit i desequilibri sedimentari.

En el cas que els cabals no tinguin suficient competència per transportar els sediments que arriben dels afluents, o d'altres fonts situades aigües avall de les preses, els sediments es depositen al llit del riu i poden haver canvis en la geometria de la llera amb altres implicacions (Kondolf, 1997). A més, si el transport es selectiu pot incrementar l'estabilitat de la llera a causa de la formació d'una cuirassa.

La càrrega sedimentària també provoca efectes en l'embassament, ja que aigües amunt de la presa tota la càrrega de sediments és depositada en les aigües tranquil·les de l'embassament i, també, aigües amunt de l'embassament en les zones d'influència per les aigües embassades. Per tant, les partícules més fines com les arenes i els llims, s'assenten pròximes a la presa i poden acabar omplint l'embassament provocant la limitació del volum d'aigua emmagatzemada (Kondolf, 1997). A causa de la disminució de l'aportació de sediments al riu, sobretot de sorres, graves, llims i argiles, hi ha importants regressions en les platges i deltes pròxims a les desembocadures de rius.

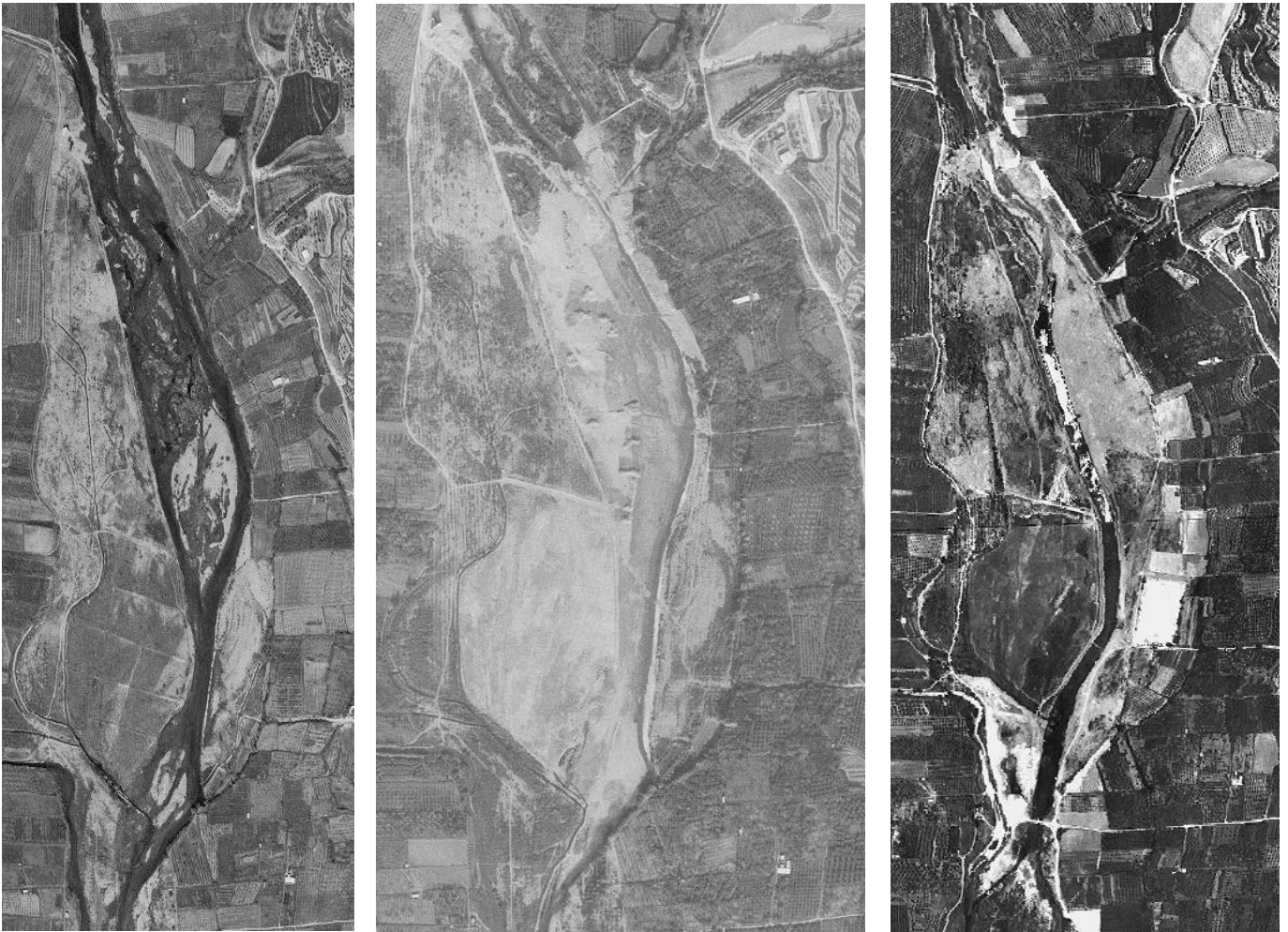
En alguns casos, els impactes sobre la transferència d'aigua i sediments conduïts per les preses han suposat la desaparició de molts quilòmetres de riu aigües avall i aquests s'han transformat en espais sense cap dinamisme, ja que modifiquen el règim fluvial del riu condicionant la magnitud i la freqüència de les crescudes. Com a conseqüència dels embassaments, el riu buscarà una nova situació d'equilibri.

Algunes de les possibles solucions per a la millora de la càrrega sedimentària aigües avall dels embassaments són (Batalla i Vericat, 2008):

- Remoure, extreure el sediments dels embassaments, drenar o feravingudes controlades d'aigua.
- Intentar que el sediment passi per la presa aprofitant les riudes.

Però, no només l'embassament afecta a la dinàmica fluvial del riu, també hi ha els casos de les extraccions d'àrids i de les hidro-puntes. Els canvis més destacats associats a les extraccions d'àrids són:

- Canvis en el pendent local, efecte migració aigües amunt i avall.
- Canvis en la geometria del canal.
- Efectes sobre els aqüífers i desconexió de la plana d'inundació.
- Desequilibri entre la disponibilitat de sediments i la capacitat de transport.



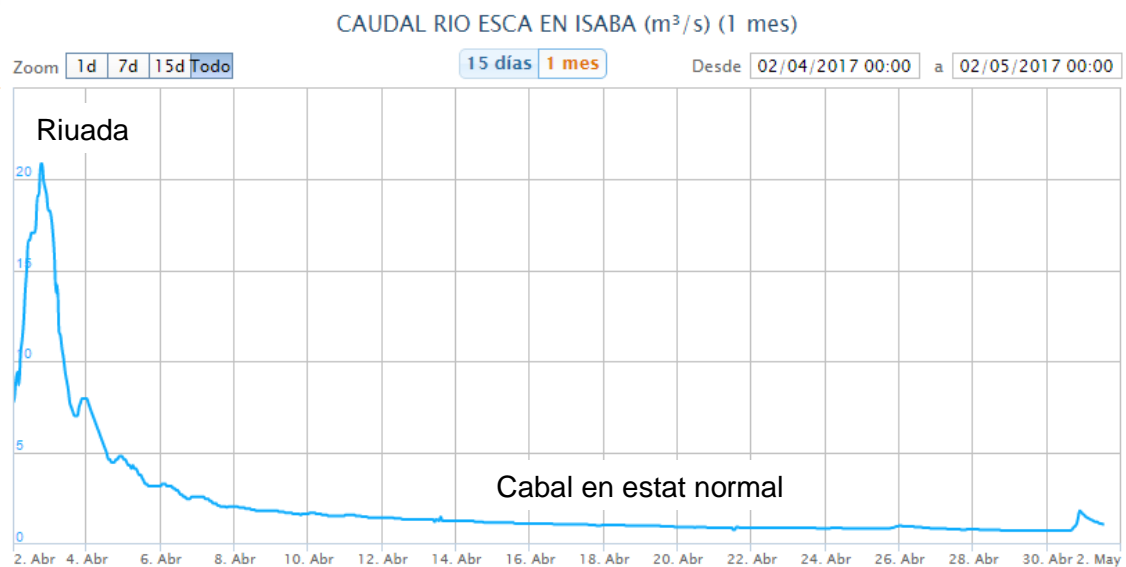
**Figura 1:** Fotografies aèries dels anys 1978, 1981 i 1987 del riu Noguera Ribagorçana que mostren els efectes de les extraccions d'àrids en la dinàmica fluvial. Font: Fotografies 1978 i 1981: IGN. Fotografia 1987: ICGC.

Tal com es pot observar en les fotografies aèries de la figura 1, des de l'any 1978 fins a l'any 1987 hi ha un canvi important pel que fa a la morfologia de la Noguera Ribagorçana, la qual cosa provoca que hi hagi una canvi de situació del canal del riu i, com a conseqüència, la reducció de l'àrea activa i de la llera.

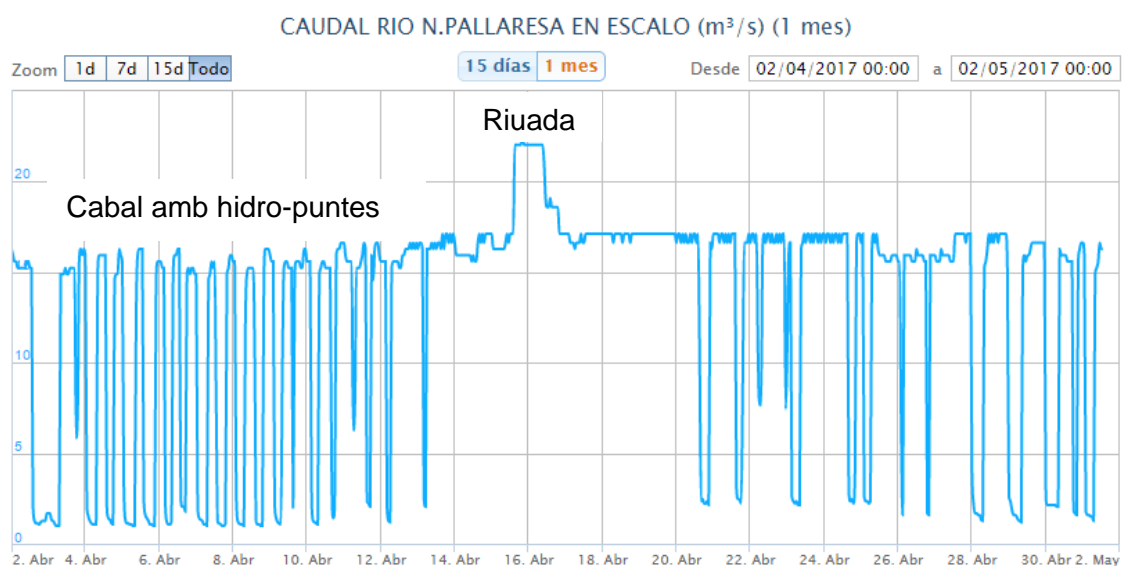
Les hidro-puntes són canvis sobtats en el cabal del riu, que estan provocades per la captació d'aigua d'un embassament per la utilització d'energia hidroelèctrica.

Aquesta captació d'aigua provoca canvis sobtats en el cabal, mentre que les principals conseqüències en el riu són:

- Canvi en el patró de mobilitat
- Rentat de materials fins amb efectes sobre la disponibilitat



**Figura 2:** Tram sense l'efecte d'hidro-puntes al riu Esca a Isaba (Navarra). Font: Saih Ebro.



**Figura 3:** Tram amb l'efecte d'hidro-puntes al riu Noguera Pallaresa a Escaló (Lleida). Font: Saih Ebro.



### **1.3. Objectiu i hipòtesis**

Aquest treball de fi de Grau té com a objectiu principal:

- Analitzar els canvis hidrològics, en el règim de crescudes, i morfològics produïts al tram baix del riu Noguera Ribagorçana aigües avall de l'embassament de Santa Ana des de l'any 1945 fins l'actualitat.

La hipòtesis d'aquest treball és:

- La construcció de l'embassament de Santa Ana, conjuntament amb la regulació general de la conca i altres impactes a escala de conca (canvis usos del sòl), ha reduït notablement el règim de crescudes (magnitud i freqüència) i ha modificat la transferència de sediments aigües avall. Aquests impactes han ocasionat un canvi en la morfologia de la llera aigües avall, com per exemple una reducció de l'amplada de la llera i augment de la vegetació de ribera.

## **2. ÀREA D'ESTUDI**

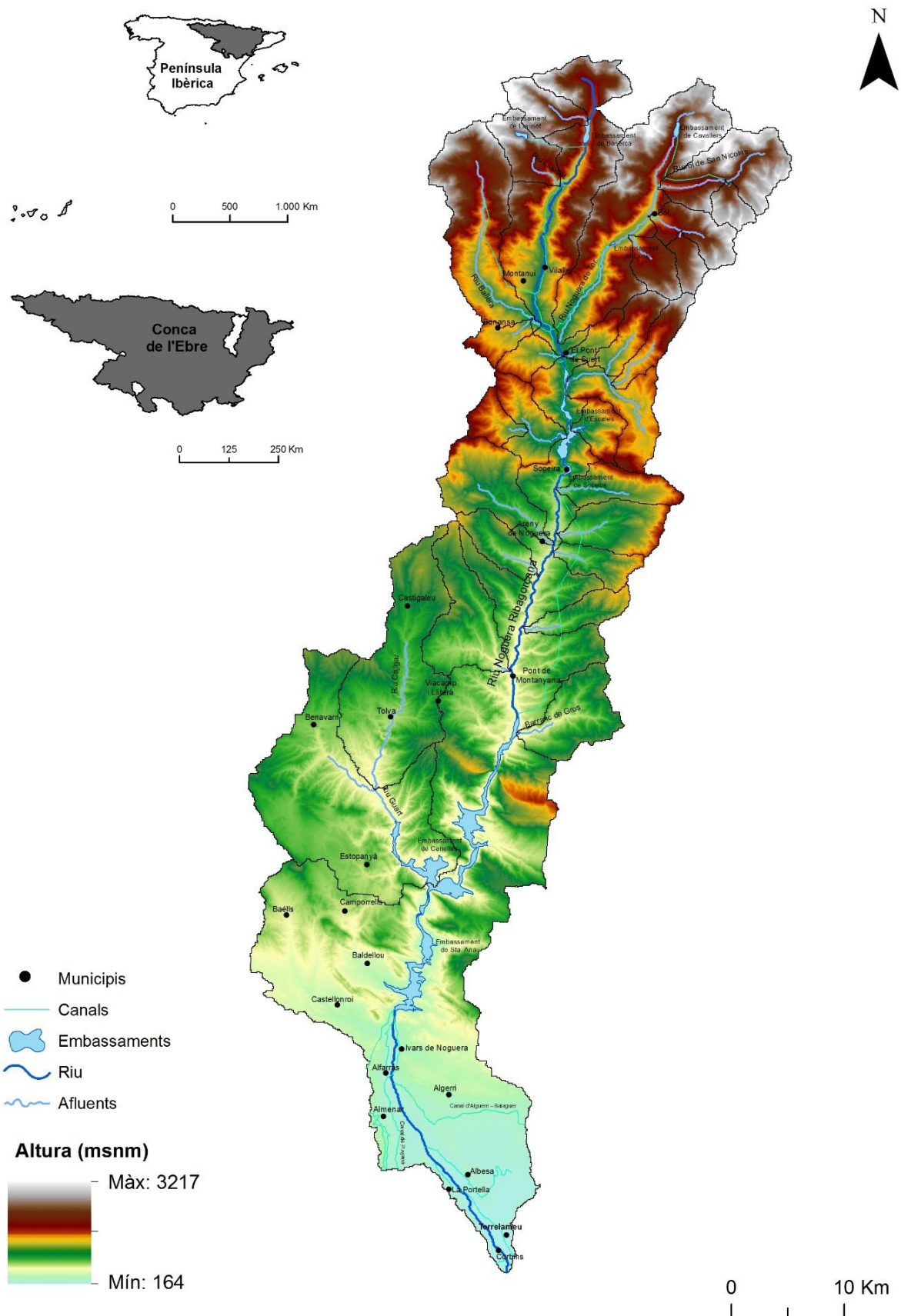
### **2.1. La conca de la Noguera Ribagorçana (climatologia, geologia hidrologia, regulació, usos del sòl i vegetació)**

En aquest apartat la majoria de la informació ha estat extreta de l'*Esborrany del Pla hidrològic del riu Noguera Ribagorçana* (2007), de la Confederación hidrográfica del Ebro.

#### **2.1.1. Descripció**

La conca de la Noguera Ribagorçana té una superfície de 2.061 km<sup>2</sup>, és estreta i allargada, amb una amplada mitjana d'uns 20 quilòmetres, la qual abasta part del territori aragonès i català. Així doncs, podem dir que aquesta conca està formada per tres unitats orogràfiques: el Pirineu occidental, el tram de Pre-Pirineu i, per últim, la depressió de l'Ebre o també anomenada depressió central catalana.

El riu Noguera Ribagorçana té una longitud d'uns 130 quilòmetres, des de la seva capçalera a més de 2.500 metres d'altura, entre el Pirineu aragonès i català, concretament, entre el macís de la Maladeta (3.205 m d'altura aprox.) i San Maurici, fins a la seva desembocadura, al riu Segre, a l'altura de la localitat de Corbins (175 m d'altura), comarca del Segrià. Cal destacar que la pendent mitjana del riu al llarg del seu recorregut és d'un 1,42%, aproximadament. El riu té una direcció dominant de nord-sud. Durant el seu recorregut el riu passa per importants poblacions, algunes d'elles són: Pont de Suert, El Pont de Montanyana, Alfarràs, entre d'altres.



**Figura 4:** Localització de la conca de la Noguera Ribagorçana i de les seves principals subconques. Elaboració pròpia mitjançant el MDT del Instituto Geográfico Nacional (IGN) i del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA).

### 2.1.2. Climatologia

El clima de la conca del riu Noguera Ribagorçana està marcat per una insolació elevada i una pluviometria escassa, a més a més, de grans oscil·lacions de temperatura a causa de la gran diferència de cota entre la capçalera i la desembocadura.

La precipitació mitjana de la conca del Noguera Ribagorçana és d'uns 725 mm/any, amb unes variacions d'uns 1100 mm/any a la zona de la capçalera del riu, i uns 390 mm/any a la zona de la seva desembocadura. Cal dir que les precipitacions més quantioses es registren a la primavera i tardor i, per contra, a l'hivern i a l'estiu la precipitació baixa notablement.

Pel que fa a les temperatures podem dir que la mitjana oscil·la entre els 4°C a la capçalera i els 14°C a la desembocadura. Les mínimes poden arribar fins als -21°C a la capçalera i les màximes poden superar els 40°C, a la desembocadura. Les temperatures més altes es donen entre els mesos de juny i agost, i les baixes entre gener i febrer.

Així doncs, s'observa que el clima de la conca del riu Noguera Ribagorçana és mediterrani<sup>3</sup>, però amb algunes varietats, ja que a la desembocadura i al tram mitjà hi ha temperatures fredes a l'hivern, molt càlides a l'estiu i amb precipitacions escasses (clima mediterrani continental), i a la capçalera del riu hi ha temperatures fredes o molt fredes a l'hivern, suaus a l'estiu i precipitacions generalment abundants durant tot l'any (clima mediterrani de muntanya).

---

<sup>3</sup> Es caracteritza per una estació seca i càlida a l'estiu, i una altra estació humida i freda a l'hivern (Diccionari de geografia física, 2003).

**Taula 1:** Valors mitjans anuals de l'estació meteorològica automàtica de Santa Ana (EM52), per a l'any 2016. Font: Saih Ebro

Descripció	Valors
Precipitació	398,7 l/m <sup>2</sup>
Temperatura màxima	38,4 °C
Temperatura mínima	- 3,7 °C
Temperatura mitjana	14,8 °C
Pressió atmosfèrica	1020,5 mbar
Humitat relativa de l'aire	71 %
Radiació solar	154 w/m <sup>2</sup>

### 2.1.3. Geologia

Una gran part de la geologia de la conca del riu Noguera Ribagorçana està sota el domini geològic del Pirineus, més concretament, fins a l'embassament de Santa Ana. I des de l'embassament fins a la seva desembocadura està sota el domini de la Depressió de l'Ebre. Malgrat aquesta diferenciació, hi ha algunes diferències dins de la pròpia conca.

Al sector de la capçalera del riu podem localitzar granits, gresos, conglomerats i margues a les zones més elevades i, a les zones de menys elevació, hi ha esquists i calcàries. En canvi, a les serres interiors, concretament, a les serres de San Marcos, Chiroa, i Montgai, podem trobar materials calcaris, mentre que a les depressions hi ha margues i sauló, del període Juràssic, Cretaci i Terciari. A les serres exteriors, al Montsec, Canelles i Santa Ana trobem les calcàries del Cretaci superior i del Eocè. I per últim, a la zona del tram baix hi ha els materials detrítics de la depressió de l'Ebre, amb un predomini de les argiles, sauló i conglomerats. Pel que fa la terrassa fluvial de la Noguera Ribagorçana el que més trobem són graves, sorres i lutites.

## Geologia

- Argiles versicolors i guixos
- Gresos
- Gresos amb intercalacions de conglomerats
- Gresos conglomerats i margues
- Gresos i llims
- Gresos i lutites
- Gresos; lutites i conglomerats
- Bretxes
- Calcàries bioclàstiques
- Calcàries bioclàstiques amb rudistes i orbitolines; calcàries margoses
- Calcàries bioclàstiques i calcàries micrítiques amb lignits
- Calcàries amb lacazina
- Calcàries amb nummulites; assilinas i alveolines
- Calcàries amb prealveolina i calcàries amb rudistes
- Calcàries amb alveolines
- Calcàries; dolomies i pissarres
- Calcàries; pelrites; gresos i conglomerats a la base.
- Cants i blocs
- Conglomerats; arenoses i argiles
- Conglomerats; gresos i lutites
- Conglomerats; arenoses i margues
- Dolomies; calcàries; margues i calcarenites
- Dolomites
- Graves i sorres
- Graves; sorres; llims i argiles
- Graves; llims i argiles
- Intercalacions de calcàries lacustres i lignits
- Lutites, turbiditas; sorres; pilotes i conglomerats polifànics
- Lutites; arenoses; grauvas; conglomerats i calcàries marmòries
- Margues amb glauconita; argiles i margocalcàries. puntualment bretxe
- Margues amb intercalacions de gresos
- Margues i gresos
- Margues i margocalcàries
- Margues i margocalcàries amb ammonites; a sastre amb lutites i lignits
- Margues; argiles i guixos amb intercalacions de calcàries
- Ofites
- Pissarres
- Pissarres ampelítiques
- Roques intrusives
- Turbiditas
- Guixos

- Municipis
- Canals
- Embassaments
- Riu
- Afluents



**Figura 5:** Distribució de la geologia de la Conca del Noguera Ribagorçana. Elaboració pròpia mitjançant el Mapa Geològic de Catalunya i del Mapa Litològic de Aragón.

#### 2.1.4. Hidrologia i regulació

La conca del riu Noguera Ribagorçana té diversos afluents, com per exemple: el riu Noguera de Tor, que conflueix amb la Noguera Ribagorçana aigües amunt de la localitat de Pont de Suert, amb un cabal mitjà diari d'uns  $6,43 \text{ m}^3/\text{s}$ ; el Valiera a la conca alta, afluent del marge dret, amb un cabal mitjà d'uns  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  i el sistema Guart-Cajigar, a la part baixa. També podem destacar que hi ha barrancs de poc recorregut amb cabals bastant irregulars que hi desemboquen.

La capçalera del riu té un règim fluvial de tipus nival<sup>4</sup>, ja que el cabal màxim es dona durant els mesos de desglaç, de l'abril fins al juny i el mínim es produeix en els mesos d'hivern, del desembre al març. També cal dir que des de l'embassament d'Escales fins a la desembocadura, el riu presenta un règim nivopluvial<sup>5</sup>.

De la conca del riu Noguera Ribagorçana podem destacar diversos embassaments. Hi ha alguns embassaments que tenen un ús hidroelèctric, aquests són: Sopeira és construït l'any 1957 i té una capacitat de  $1 \text{ hm}^3$ ; Cavallers data de l'any 1960 i té una capacitat total de  $16 \text{ hm}^3$ ; Llauset és construït l'any 1980 i la seva capacitat són  $15,5 \text{ hm}^3$ ; i Baserca data de l'any 1983 i té una capacitat útil de  $22 \text{ hm}^3$ . També trobem embassaments destinats a usos de regadiu, proveïment de la població i producció hidroelèctrica. Aquests embassaments són: Escales, que és construït l'any 1955 i té una capacitat útil de  $152 \text{ hm}^3$ ; Canelles, que data de l'any 1961 i té una capacitat total de  $679 \text{ hm}^3$  i, finalment, Santa Ana, que és construït l'any 1962 i té una capacitat útil de  $238 \text{ hm}^3$ . L'aportació natural en  $\text{hm}^3/\text{any}$  a l'altura de l'embassament de Santa Ana és de  $534,09 \text{ hm}^3$ , i la capacitat total de regulació dels embassaments és de  $1123,5 \text{ hm}^3$ . Aquests valors signifiquen una capacitat de regulació de gairebé el 210% de l'aportació anual (segons l'índex IR desenvolupat per Batalla et al. 2004

---

<sup>4</sup> És el propi de serralades de més de 2.500 metres. Des del maig fins al mes de juliol són cabals elevats i l'estiatge coincideix amb l'estació freda i, per tant, hi ha la retenció nival (Mateu Bellés, 1993).

<sup>5</sup> Els cabals alts de finals de maig són relativament més abundants, la qual cosa es dona entre els 2.000–2.500 metres d'altura. En aquest règim hi ha una major rellevància de la retenció fusió nival (Mateu Bellés, 1993).

que relaciona el volum total dels embassaments amb l'aportació mitjana anual). Per tant, podem dir que és un riu molt regulat.

Aquest riu presenta un ús hidroelèctric molt important i compleix una funció d'abastament d'aigües, arreu de les zones de regadiu de la part baixa de la conca o d'altres conques veïnes.

En aquest tram trobem el canal de Pinyana i el canal d'Algerri-Balaguer i nombroses sèquies de reg.

I per últim, pel que fa a la longitud de la llera natural del riu Noguera Ribagorçana podem dir que dels 130 km de longitud total de la llera, 9 km són de llera amb cabal natural, 71 km de llera amb derivació de cabal i 50 km de llera convertida en embassament (pàgina web de la Institució Catalana d'Història Natural).

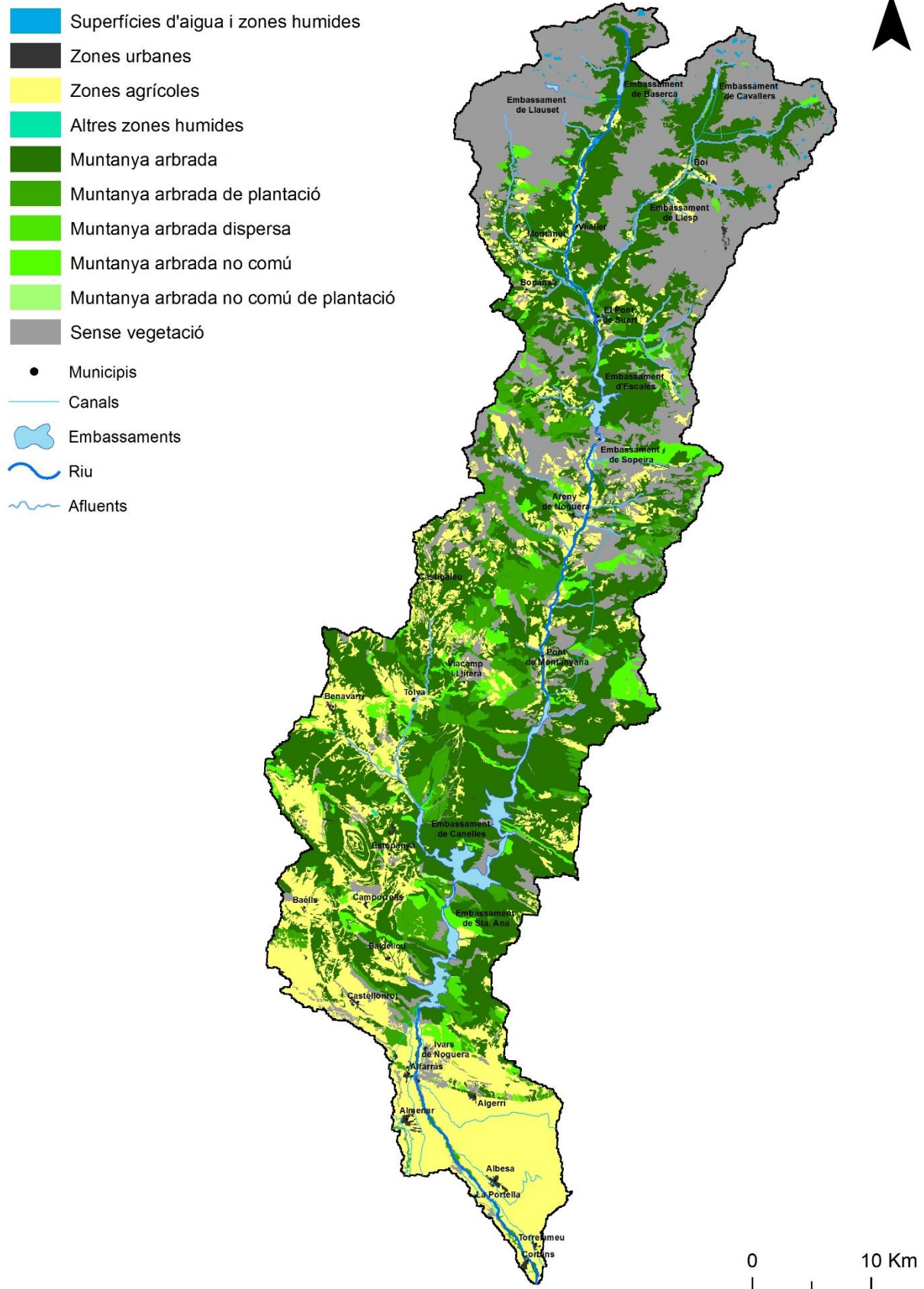
#### **2.1.5. Usos del sòl**

Pel que fa als usos del sòl, a la Conca de la Noguera Ribagorçana hi ha zones d'alta muntanya on hi predominen les àrees sense vegetació i, al fons de les valls, l'arbrat. En la zona de Prepirineu predominen els usos del sòl mixt, amb mescles d'arbrat, arbrat de plantació, arbrat no comú i arbrat no comú de plantació. I per últim, a la zona baixa predomina bàsicament les zones agrícoles.

En general, aquesta conca presenta un elevat grau de repoblament i la superfície forestal es distribueix, d'una forma molt encertada, per la major part de la conca, exceptuant les zones de capçalera. Així doncs, la conca té una superfície del terreny dominada majoritàriament pel bosc (27%), bardissa (30%), secà (16%), prats i pastures (9%) i regadiu (4%).



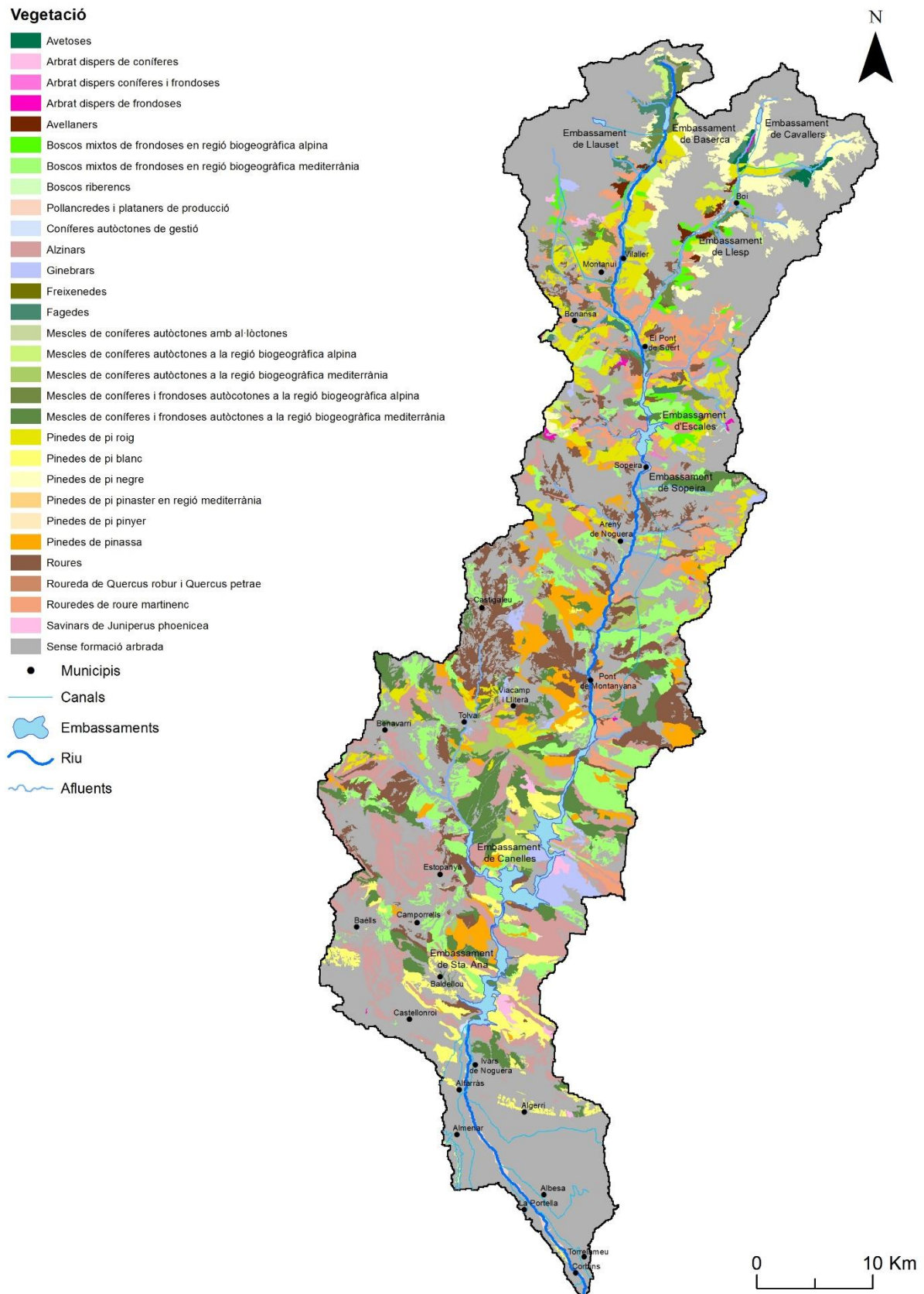
## Usos del sòl



**Figura 6:** Distribució dels usos del sòl a la conca de la Noguera Ribagorçana. Elaboració pròpia mitjançant el Mapa Forestal d'Espanya del Ministerio de Agricultura, Alimentación i Medio Ambiente (MAPAMA).

### **2.1.6. Vegetació**

A la conca del riu Noguera Ribagorçana hi ha diversos tipus de vegetació, a la zona d'alta muntanya predominen les àrees sense formació arbòria, però també podem trobar indrets on hi ha avets, pinedes de pi roig i de pi negre, matolls i les pastures d'alta muntanya. A l'àrea de mitja muntanya, entre el Pont de Suert i fins a la serra del Montsec, hi predomina el matoll i les mescles de coníferes. A la zona de la serra de Montsec fins a l'embassament de Santa Ana hi podem trobar vegetació dominada pel matoll, els roures, pinedes de pinassa i les mescles de coníferes i frondoses. I per últim, aigües avall de l'embassament de Santa Ana, hi ha vegetació pròpia dels camps agrícoles on predominen els arbres fruiters i els camps de cereal. També hi ha algunes formacions de pinedes de pi pinyer i alzinars.

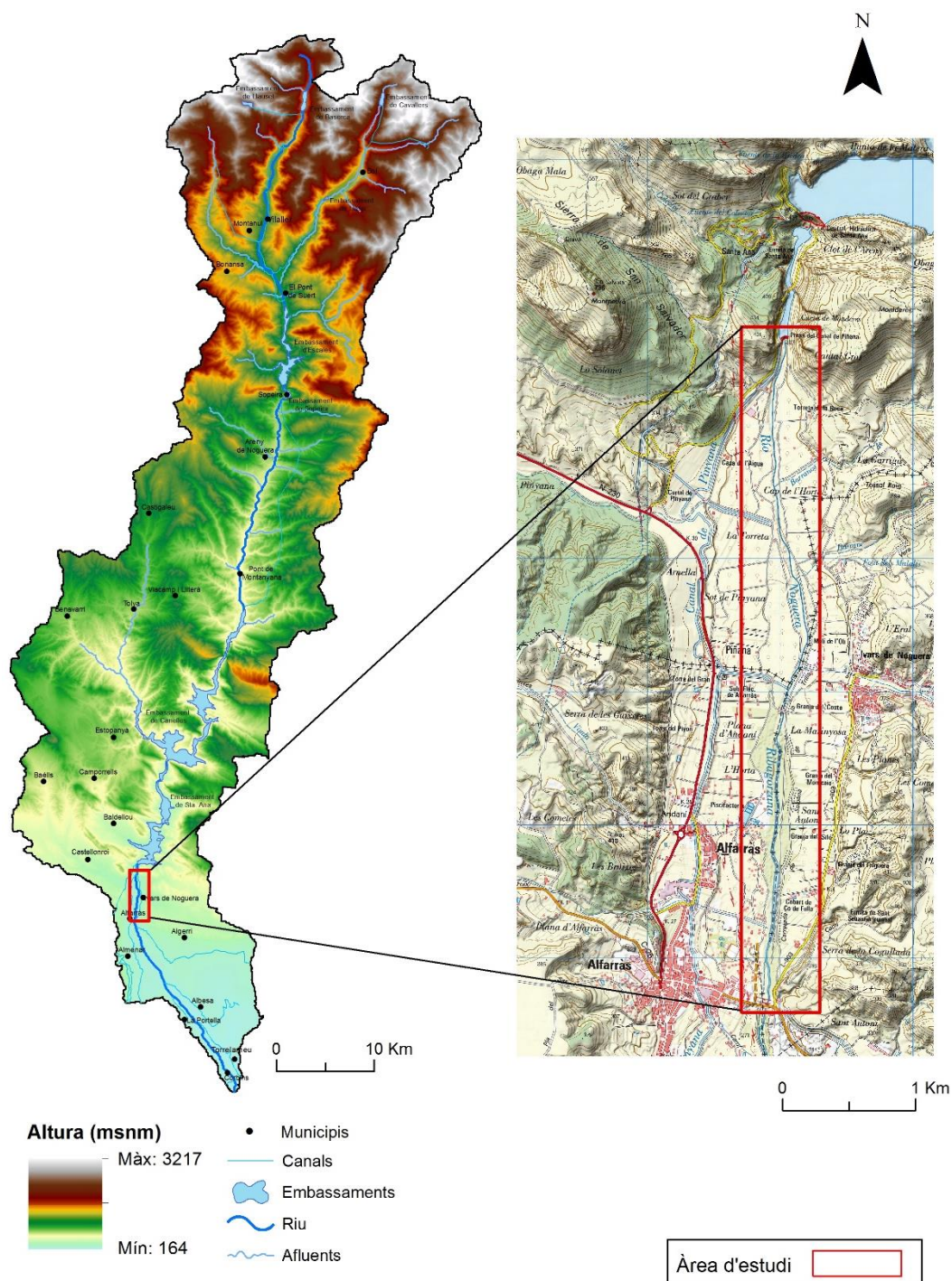


**Figura 7:** Distribució de la vegetació a la conca de la Noguera Ribagorçana. Elaboració pròpia mitjançant el Mapa Forestal d'Espanya del Ministerio de Agricultura, Alimentación i Medio Ambiente (MAPAMA).



## 2.2. El tram baix de la Noguera Ribagorçana

El tram d'estudi compren la zona que va des de la presa de Santa Ana fins al pont vell d'Alfarràs (segle XIII–XIV). Aquest tram té una llargada de 5 quilòmetres i abasteix el terme municipal de Castellonroi, que pertany a la província d'Osca, i els termes municipals d'Alfarràs i Ivars de Noguera, que pertanyen a la província de Lleida.



**Figura 8:** Localització de l'àrea d'estudi dins de la conca de la Noguera Ribagorçana. Elaboració pròpia mitjançant el MDT i el Mapa Topogràfic Nacional del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Pel que fa a la regulació hidrològica del riu podem destacar l'embassament de Santa Ana, que està situat a una cota de 380 metres sobre el nivell del mar. L'embassament es troba en funcionament des de l'any 1962 i està situat al municipi de Castellonroi (Osca). La seva presa és de tipus d'arc gravetat, amb un radi de curvatura de 200 metres, una altura de 100 metres i una capacitat total d'emmagatzematge de  $238 \text{ hm}^3$ , amb la qual cosa ocupa una superfície de 768 hectàrees. La capacitat d'evacuació del sobreeixidor és de  $1920 \text{ m}^3/\text{s}$ , també cal destacar que la presa té dos desaigües de fons laterals situats a la cota 306 metres.

Aquest embassament serveix per abastir d'aigua moltes poblacions, entre les quals es destaca la ciutat de Lleida. També serveix per subministrar aigua al Canal de Pinyana, al Canal Algerri-Balaguer i al Canal d'Aragó i Catalunya, mitjançant un canal d'enllaç. D'aquest embassament també se'n fa un ús d'aprofitament hidroelèctric, gràcies a la central que hi ha a peu de presa. L'embassament fa que es pugui garantir el cabal mínim del riu fins a la seva desembocadura, el riu Segre.



**Figura 9:** Embassament de Santa Ana. Font: Fotografia pròpia.

A finals d'octubre de l'any 1988 es va realitzar una actuació de gestió a la presa de Santa Ana, parlem doncs, del buidatge del embassament de Santa Ana.

Aquets tipus d'actuacions també s'han realitzat en altres medis com per exemple al riu Éssera, a l'embassament de Barasona o Joaquín Costa (Palau, 1995; Morillo i García de Jalón, 1998). En el cas de Santa Ana, segons els informes revisats (Palau, 1990, 1991a, 1991b) es poden extreure les següents conclusions. El motiu pel qual es fa el buidatge és perquè es vol reparar l'automatisme de les comportes dels desaigües del fons de la presa, ja que estaven aturades pel desús en el temps i, per tant, no funcionaven. Algunes de les accions que es van dur a terme i que poden causar efectes sobre el riu són:

- Operacions prèvies de condicionament de la llera, com són els dragatges i eixamplament.
- Canvis en la qualitat de l'aigua a l'alliberar-se les aigües del fons de l'embassament (augment terbolesa de l'aigua).
- Augment dels cabals circulants i del seu rang de fluctuació lliure.
- Augment de la carga de sòlids en suspensió.

Com a conseqüència d'aquestes accions, els principals impactes són:

- Canvis en la morfologia del riu.
- Canvis en la qualitat fisicoquímica de les aigües.
- Canvis en les comunitats naturals aquàtiques.



A continuació, mostraré algunes fotografies després del buidatge de Santa Ana (Palau, 1991).



**Figura 10:** Riu Noguera Ribagorçana amb la llera estabilitzada amb mostres de vegetació dins de la plana d'inundació, pròxim al municipi d'Ibars de Noguera. En aquesta foto i en altres es pot veure la mota que es va construir en el marc del projecte i buidatge de l'embassament que ha tingut un impacte directe sobre la plana d'inundació i altres unitats morfològiques. Font: A. Palau, 1991.



**Figura 11:** Plana d'inundació del riu Noguera Ribagorçana amb mostres de graves, còdols i vegetació. Font: A. Palau, 1991.



**Figura 12:** Exemple d'intrusió de la vegetació en la llera del riu Noguera Ribagorçana. Aquest tram indica una gran estabilitat de la llera. Font: A. Palau, 1991.



**Figura 13:** Riu Noguera Ribagorçana just després de l'assut de derivació del canal de Pinyana l'any 1991. Font: A. Palau, 1991.





**Figura 14:** Riu Noguera Ribagorçana just després de l'assut de derivació del canal de Pinyana l'any 2017. S'observa com la vegetació a guanyat en extensió: Font: Fotografia pròpia.

Com es pot observar a la figura 13 i 14, tot i que la llera està estable des de l'any 1987, aproximadament, la vegetació ha anat guanyant en extensió i ha ocupat la zona que abans era plana d'inundació, la qual cosa indica més estabilitat.

L'altra infraestructura hidràulica important és el Canal de Pinyana, el qual s'alimenta de les aigües de la Noguera Ribagorçana. Aquest canal té una longitud de 54 km i abasteix una zona de regadiu d'unes 13.891 hectàrees, amb uns 7.190 regants aproximadament. Aquest canal subministra aigua als municipis d'Alfarràs, Almenar, Alguaire, Vilanova de Segrià, Corbins, Rosselló, Torrefarrera, Alpicat, Lleida, Alcarràs i Torres de Segre (província de Lleida) i, per últim, a Castellonroi (Osca).

En el tram que s'està estudiant, s'observa que es continua derivant l'aigua del riu cap a diferents canals o sèquies, com és el cas del canal Algerri–Balaguer o els petits assuts de derivació, com és el cas de la piscifactoria de Santa Ana. Això comporta la disminució progressiva del cabal a mesura que va avançant el recorregut del riu aigües avall. Per tant, l'embassament provoca una barrera insuperable pels sediments i fa que es quedin dipositats a l'interior de l'embassament i, com a conseqüència, la manca d'aportació de sediments en el tram baix és molt deficitària. Així doncs, la llera presenta un traçat molt rectilini i

simplificat, i amb poc cabal, d'uns 6 m<sup>3</sup>/s, aproximadament, durant gran part de l'any.

En el tram d'estudi, la vegetació ha anat guanyant terreny fins a la llera del riu gairebé. En aquesta zona hi ha un extens bosc de ribera, abundants canyissars i herbassars humits. El bosc de ribera està format per alberedes i salzedes, on es destaca el salze blanc (*Salix alba*), nombrosos àlbers (*Populus alba*) i pollancre (*Polupas nigra*). I en a la zona inundable, a la vora de la llera hi ha els extensos canyissars<sup>6</sup> (*Phragmites australis*) i els bogars<sup>7</sup> de fulla estreta (*Typha angustifolia*) (Agència Catalana de l'Aigua, Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge, 2008).

---

<sup>6</sup> Planta cosmopolita de la família de les gramínies, semblant a la canya però més gràcil, que creix, sovint formant grans colònies, a les vores d'estanys i de rius i en general en tots els indrets on hi ha una capa freàtica alta o en terrenys inundats (<http://dlc.iec.cat/>, Diccionari de la llengua catalana de l'IEC).

<sup>7</sup> Planta herbàcia del gènere *Typha*, de la família de les tifàcies, d'inflorescència a manera de cilindre compacte de color bru, que es fa als aiguamolls i a les aigües de curs lent, les fulles de la qual, linears, molt llargues i coriàcies (<http://dlc.iec.cat/>, Diccionari de la llengua catalana de l'IEC).

### 3. MÈTODES

En aquest apartat es presenta tota la informació relacionada amb el desenvolupament metodològic del treball, com s'han obtingut les dades hidrològiques, d'on s'han extret les fotografies aèries i, finalment, com s'ha realitzat el tractament de la informació. Tot seguit explicaré els passos necessaris pel desenvolupament del treball:

#### 3.1. Informació disponible

A continuació, presentaré les principals fonts d'informació consultades per a la realització de l'estudi dels anàlisis hidrològics i morfològics del tram de riu observat. Les dades de cabals i les fotografies aèries són les següents:

En les dades de cabals tenim disponible:

- Sèries anuals:
  - Aportació hídrica anual
  - Cabal mitjà anual
  - Cabal mitjà diari màxim anual ( $Q_c$ )
  - Cabal màxim instantani diari anual ( $Q_{ci}$ )
- Sèries mensuals:
  - Cabal mitjà mensual
  - Cabal mitjà diari màxim mensual
  - Cabal màxim instantani diari mensual

Les fotografies aèries disponibles són:

- Informació cartogràfica amb accés mitjançant un servidor extern del ICGC (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya<sup>8</sup>)
- Fotografies aèries no georeferenciades del IGN (Instituto Geográfico Nacional<sup>9</sup>)

---

<sup>8</sup> Agència cartogràfica de la Generalitat de Catalunya, creada l'any 1982. Té cura de la producció i la distribució de la cartografia oficial de Catalunya (Diccionari terminològic de sistemes d'informació geogràfica, 2012).

<sup>9</sup> Agència cartografia oficial de l'Estat espanyol, fundada l'any 1870. S'ocupa de la formació i actualització dels mapes estatals (Diccionari terminològic de sistemes d'informació geogràfica, 2012).

Tot seguit, es descriu de manera específica el conjunt de les dades disponibles que s'han introduït anteriorment.

### 3.1.1. Dades de cabal

Gràcies a l'estació d'aforament de Pinyana (9097) tenim disponible les dades històriques de cabals de la Noguera Ribagorçana, des de l'any 1945 fins a l'any 2013. Aquestes dades estan disponibles a les següents webs:

- Redes de Seguimiento del Estado e Información Hidrológica (<http://sig.mapama.es/redes-seguimiento/visor.html?herramienta=Aforos>)
- Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (<http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-datos.asp?indroea=9097>)

Aquestes dades seran útils per estudiar els canvis hidrològics al llarg dels anys. Si es comparen les dades de cabal pre-embassament (any 1947 a any 1962) i post-embassament (any 1962 a any 2015) es podran veure els efectes que té l'embassament sobre el règim de cabals i riudes.

Cal destacar que en la sèrie dels Qci no tenim tots els anys disponibles, ja que hi havia alguns buits (possibles errades tècniques). Per poder obtenir les dades hidrològiques s'ha fet una estimació estadística de la sèrie del cabals, cosa que s'explica més endavant.

A continuació es mostra la informació disponible sobre l'estació d'aforament de Pinyana, que és d'on s'ha extret les dades de cabal tal i com s'ha indicat anteriorment:

- **Procedència:** Confederación hidrogràfica de l'Ebro
- **Estació aforament:** 9097 Pinyana
- **Situació:** Terme municipal de Castellonroi, província d'Osca
- **Coordenades UTM:** X: 796948, Y: 4642314, Fus: 30, Datum : ETRS89
- **Inici:** Any 1946
- **Cota (m):** 300 metres
- **Conca receptora:** 1.757 km<sup>2</sup>
- **Sistema d'explotació:** Gállego, Cinca, Éssera i Noguera Ribagorçana

- **Tipus d'estació:** canalització amb canal de aigües baixes
- **Règim cabals:** alterat
- **Amplada (m):** 45 metres
- **Duració de la sèrie:** 67 anys
- **Anys complets:** 55 anys



**Figura 15:** Estació d'aforament de Pinyana. Font: Fotografia pròpia.

### 3.1.2. Fotografies aèries

L'estudi de l'evolució dels canvis morfològics i hidrològics del riu Noguera Ribagorçana com també la seva evolució al llarg dels anys, s'ha realitzat a través de fotografies aèries històriques i d'ortofotos actuals, des de l'any 1945 fins a l'actualitat. Aquesta elecció ha estat determinada pel número de períodes a estudiar i per la disponibilitat de les fotografies i ortofotos.

Gràcies al servidor raster de l'ICGC del WMS<sup>10</sup> d'ortofotos històriques ha estat possible obtenir els materials que permetran la realització d'aquest treball,

---

<sup>10</sup> És un servei de consulta de mapes *online* que permet visualitzar i consultar imatges georeferenciades de mapes, els quals són proporcionats per un servidor de mapes que funciona a través d'una base de dades de SIG (Diccionari terminològic de sistemes d'informació geogràfica, 2012).

exceptuant la fotografia aèria de l'any 1981 que està extreta del IGN i, per tant, s'ha hagut de georeferenciar.

Disposem de dos sèries disponibles de pre-embassament, que són les sèries de l'any 1945-46 i 1956-57 i després hi ha diverses sèries post embassament, anys 1981, 1987, 1996-1997, 2002, 2010 i 2015. Tot seguit enumeraré les sèries de les ortofotos, fotografies aèries i algunes de les seves principals característiques:

#### **Ortofoto de Catalunya de l'any 1945-46**

- **Escala:** 1:10.000
- **Color:** blanc i negre
- **Procedència:** Servidor Raster ICGC - WMS d'ortofotos històriques
- **Georeferenciat:** sí
- **Format:** digital

#### **Ortofoto de Catalunya de l'any 1956-57**

- **Escala:** 1:5000
- **Color:** blanc i negre
- **Procedència:** Servidor Raster ICGC - WMS d'ortofotos històriques
- **Georeferenciat:** sí
- **Format:** digital

#### **Fotografia aèria de l'any 1981**

- **Data:** novembre de l'any 1981
- **Escala:** 1:30.000
- **Color:** blanc i negre
- **Procedència:** Instituto Geográfico Nacional
- **Georeferenciat:** no
- **Format:** digital

#### **Ortofoto de Catalunya de l'any 1987**

- **Escala:** 1:5000
- **Color:** blanc i negre
- **Procedència:** Servidor Raster ICGC - WMS d'ortofotos històriques
- **Georeferenciat:** sí

- **Format:** digital

#### **Ortofoto de Catalunya de l'any 1996-97**

- **Escala:** 1.5000
- **Color:** blanc i negre
- **Procedència:** Servidor Raster ICGC - WMS d'ortofotos històriques
- **Georeferenciat:** sí
- **Format:** digital

#### **Ortofoto de Catalunya de l'any 2002**

- **Escala:** 1.5000
- **Color:** sí
- **Procedència:** Servidor Raster ICGC - WMS d'ortofotos històriques
- **Georeferenciat:** sí
- **Format:** digital

#### **Ortofoto de Catalunya de l'any 2010**

- **Escala:** 1.5000
- **Color:** sí
- **Procedència:** Servidor Raster ICGC - WMS d'ortofotos històriques
- **Georeferenciat:** sí
- **Format:** digital

#### **Ortofoto de Catalunya de l'any 2015**

- **Escala:** 1.5000
- **Color:** sí
- **Procedència:** Servidor Raster ICGC - WMS d'ortofotos històriques
- **Georeferenciat:** sí
- **Format:** digital

Una vegada obtingudes les ortofotos i les fotografies aèries s'han cartografiat en planta, amb l'objectiu de calcular la seva extensió, delimitar les unitats morfològiques i, finalment, per crear una base de dades cartogràfica que permeti fer un estudi detallat.

### 3.2. Tractament de la informació

Per fer una anàlisi de la informació s'han utilitzat els programes següents:

- **Microsoft Office, Power Point i Excel 2013:** programes utilitzats en l'elaboració del treball, tant en el text com en la creació de gràfics i càlculs.
- **ArcGis (ArcMap 10.3.1):** programa informàtic produït i comercialitzat per l'empresa Esri dins del camp de SIG (sistemes d'informació geogràfica<sup>11</sup>). Aquest permet editar, analitzar, tractar, dissenyar i publicar qualsevol tipus d'informació geogràfica. L'ArcMap ha estat utilitzat durant tot el treball, perquè permet realitzar el tractament de la georeferenciació d'imatges aèries i crear mapes, per tal d'estudiar els canvis morfològics del riu.

#### 3.2.1. Neteja de dades de cabal

En aquest apartat explicaré com s'han obtingut les dades de cabal que no estaven disponibles a la sèrie de dades originals. Aquests valors feien referència als Qci, ja que faltaven dades d'alguns anys i, per tant, no teníem disponibles tots els valors de la sèrie. Per ser més concrets, els anys que no teníem eren el 1947–1950, 1952–1955, 1962, 1965, 1970 i, per últim, l'any 1979.

Per poder analitzar la magnitud de les crescudes es fa una estimació de cabals màxims per a tot el període estudiat, per ser el més fiable possible. El nostre objectiu és cercar una continuïtat en la sèrie de cabals màxims, encara que la sèrie de Qci presenti buits. Per tant, el que es realitza és una estimació dels cabals màxims instantanis (Qci) amb els cabals màxims mitjans anuals (Qc), que ja teníem complets.

---

<sup>11</sup> Sistema informatitzat format per maquinari, programari, dades, usuaris i un marc organitzatiu que permet compilar, emmagatzemar, gestionar, analitzar, consultar, visualitzar, presentar i difondre qualsevol tipus d'informació geogràfica (Diccionari terminològic de sistemes d'informació geogràfica, 2012).

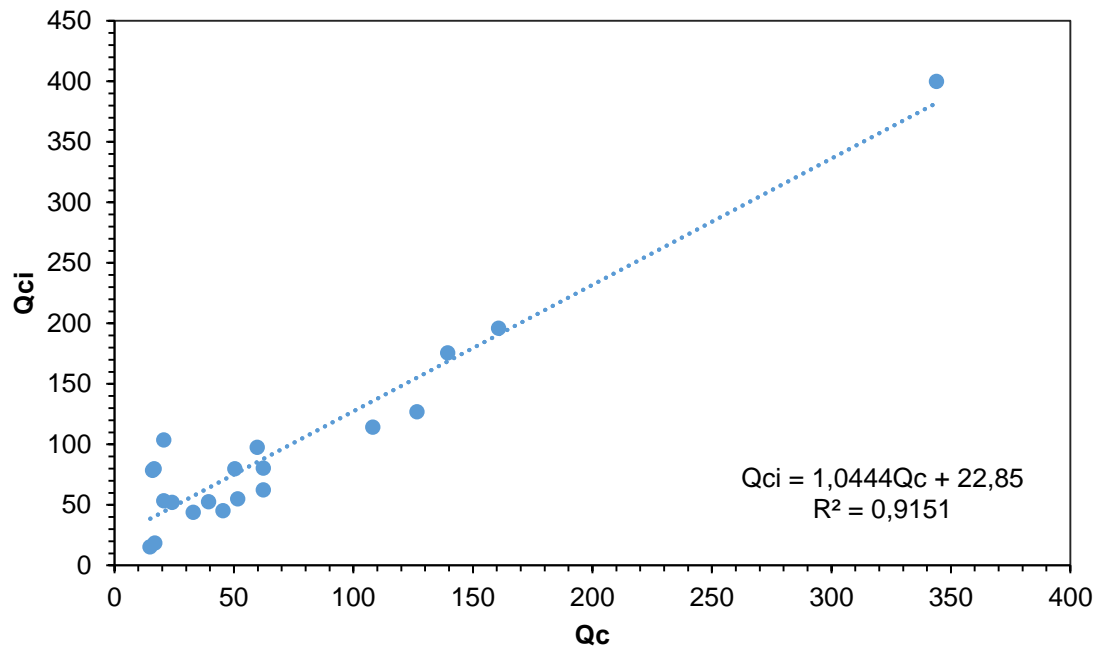


Primer escollirem les dades dels Qci i Qc, cal que siguin exactament iguals pel que fa als anys, mes i dia, o que no hagi massa diferència entre el Qci i el Qc. Una vegada fet el recompte obtenim una coincidència de 20 anys, amb dades molt semblants (Taula 2).

**Taula 2:** Dades dels Qci i Qc per poder elaborar l'estimació de cabals. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades extretes del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

Qci			Qc		
Any	Data	Cabal m <sup>3</sup> /s	Any	Data	Cabal m <sup>3</sup> /s
1951	/ 05/ 1951	400	1951	31/ 05/ 1951	344
1958	10/ 04/ 1958	44	1958	10/ 04/ 1958	32,95
1960	02/ 12/ 1959	196	1960	02/ 12/ 1959	160,83
1961	07/ 10/ 1960	127	1961	07/ 10/ 1960	126,6
1966	26/ 08/ 1966	55	1966	26/ 08/ 1966	51,6
1967	15/ 06/ 1967	97,7	1967	15/ 06/ 1967	59,8
1969	25/ 06/ 1969	175,8	1969	25/ 06/ 1969	139,5
1971	16/ 06/ 1971	114,4	1971	16/ 06/ 1971	108,08
1974	17/ 07/ 1974	80,6	1974	17/ 07/ 1974	62,4
1975	07/ 10/ 1974	62,4	1975	11/ 10/ 1974	62,4
1976	13/ 11/ 1975	52,78	1976	13/ 11/ 1975	39,44
1980	14/ 11/ 1979	45,46	1980	14/ 11/ 1979	45,46
1987	/ 06/ 1987	15,32	1987	17/ 06/ 1987	14,96
1988	/ 08/ 1988	18,48	1988	01/ 08/ 1988	16,92
1989	/ 11/ 1988	80,02	1989	27/ 10/ 1988	50,4
1993	20/ 07/ 1993	80,02	1993	20/ 07/ 1993	16,6
1994	19/ 07/ 1994	78,56	1994	19/ 07/ 1994	16,04
2007	21/ 08/ 2007	103,7	2007	15/ 08/ 2007	20,66
2010	20/ 07/ 2010	53,66	2010	24/ 07/ 2010	20,74
2012	17/ 07/ 2012	52,3	2012	28/ 07/ 2012	24,1

Un cop realitzat el procés, el que farem serà una recta de regressió que servirà per analitzar la relació o, bé, la dependència que hi ha entre les variables estudiades. En el nostre cas, la recta de regressió (Figura 16) dona un coeficient de determinació de  $R^2$  de 0,91, la qual cosa indica que hi ha una correlació molt alta entre les variables analitzades i que, per tant, l'ajust entre el Qci i el Qc és molt fiable. Així, si es disposa d'un valor de Qc es pot estimar un valor de Qci per tal de tenir continuïtat en la sèrie de cabals analitzada. Com es pot observar al gràfic, el núvol de punts pròxim a la recta indica aquesta alta correlació.



**Figura 16:** Recta de regressió dels Qci i Qc. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades extretes del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

L'equació obtinguda és  $Q_{ci} = 1,0444Q_c + 22,85$  i permet, a partir d'un valor de  $Q_c$  conegut obtenir el corresponent valor de  $Q_{ci}$  tant aproximats a la realitat com sigui possible.

La taula 3 mostra un exemple de càlcul. En aquest cas el que es fa és substituir el valor de  $Q_c$  a l'equació:  $1,0444 \cdot (286) + 22,85 = 321,55 \text{ m}^3/\text{s}$ , i el valor resultant serà el  $Q_{ci}$  que utilitzarem en la sèrie.

**Taula 3:** Exemple de càlculs. Elaboració pròpia.

Qci		
Any	Data	Cabal m <sup>3</sup> /s
1947	No disponible	No disponible

Qc		
Any	Data	Cabal m <sup>3</sup> /s
1947	05/ 03/ 1947	286

### 3.2.2. Anàlisis hidrològics

En aquest apartat explicaré com s'han realitzat les anàlisis hidrològiques del riu Noguera Ribagorçana. Primer explicaré els procediments que s'han dut a terme per analitzar el règim de crescudes a partir dels  $Q_{ci}$  i  $Q_c$ , després parlaré especialment atenció als cabals mitjans mensuals i anuals i, per últim, a l'aportació hídrica mensual i anual.

Un cop obtingudes les dades de cabal màxim instantani i mitjà diari a nivell mensual, el que farem amb l'ajuda del Microsoft Excel és fer el càlcul del valor mitjà de cada mes de les dades pre i post embassament. Després es crea un gràfic de columnes i es diferencia els períodes pre i post embassament, amb l'objectiu d'observar l'evolució i dissemblances que hi ha al llarg dels anys en els cabals. Per altra banda, amb les dades del  $Q_{ci}$  anual, el que es fa és un gràfic de dispersió de línies rectes, en el qual es diferencia els anys pre i post embassament. En el cas del  $Q_c$  anual es fa el mateix procediment que l'anterior.

A l'hora de calcular els períodes de retorn dels cabals de la sèrie s'utilitzen les fórmules de distribució de probabilitat de Weibull i Gringorten a partir dels valors  $Q_{ci}$  amb la sèrie completa.

- **La fórmula de Weibull:**  $P(X) = r / N+1$  o  $T(X) = (N+1) / r$
- **La fórmula de Gringorten:**  $P(X) = (r-0,44) / N+0,12$

**T(X):** és el període de retorn o freqüència mitjana d'ocurrència d'un cabal màxim anual donat.

**P(X):** és igual a  $1/T(X)$  i és la probabilitat de què un cabal màxim anual iguali o superi X en un any en concret.

**r:** és la posició a la sèrie de Q.

**N:** és el número de dades de la sèrie de Q

També s'ha utilitzat la llei de Gumbel (lleï de distribució d'extrems pel mètode dels moments), molt útil a l'hora de calcular valors extrems. Aquesta es calcula a partir de la següent fórmula:

$$Q_{xt} = Q_x - [(0,45 + 0,78 \ln \ln (T/T-1))] * \sigma$$

**T:** període de retorn.

**Q<sub>x</sub>:** Cabal mitjà de la sèrie.

$\sigma$ : desviació estàndard

També s'ha calculat el cabal mitjà mensual i anual. Per analitzar el cabal mitjà mensual el que s'ha elaborat un gràfic de tipus columna i també s'ha diferenciat el cabal pre i post embassament.

En el cas de l'aportació hídrica mensual s'ha calculat el valor mitjà de cada mes i després s'ha fet un gràfic de columna, amb l'objectiu de diferenciar l'aportació hídrica pre i post embassament. Pel que fa al càlcul de l'aportació hídrica anual s'ha fet un gràfic de dispersió amb línies rectes, la qual cosa permet observar l'evolució durant els anys. També es calcula l'aportació mitjana pre i post embassament, tant la d'aquest últim punt com la de tota la sèrie en general.

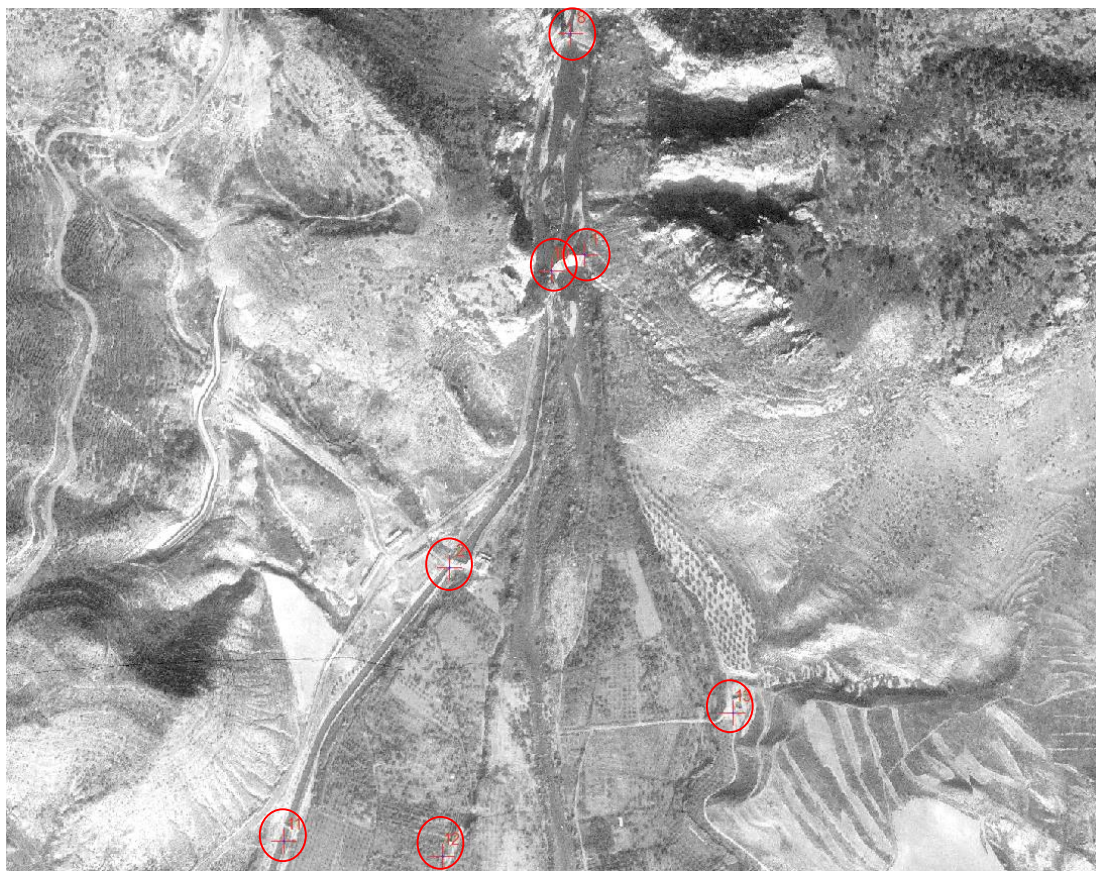
### **3.2.3. Georeferenciació de fotogrames històrics**

La georeferenciació d'imatges permet assignar unes noves coordenades geogràfiques a les imatges i així permetre la correcta ubicació espacial quan es visualitza en un SIG. Durant el procés de georeferenciació d'imatges s'apliquen diferents funcions numèriques de transformació, que fan que es modifiquin les coordenades dels píxels de la imatges, i així s'obtinguin unes noves coordenades.

La georeferenciació s'ha utilitzat en la fotografia aèria de l'any 1981 i com a referència s'ha usat la ortofoto de l'any 2015. Primer s'elabora una sèrie de punts de control entre la imatge a georeferenciar (1981) i la de referència (2015). Per fer aquest pas s'ha de tenir en compte factors com la localització, número i distribució dels punts de control, ja que és fonamental seguir aquests tres factors per obtenir un número de punts de control ben distribuïts.

Per dur a terme aquest procés s'han elegits punts que siguin identificables a les dues fotografies i que durant aquests anys no hagin canviat, alguns exemples són: un pont, una presa, una cantonada d'una casa, etc. Una vegada identificats els punts, els distribuïrem de manera uniforme durant al llarg de la zona d'estudi i s'obtenen les coordenades geogràfiques d'aquests. Aquestes coordenades s'obtenen a partir de la base de referència, ortofoto de 2015. A continuació es

mostra la fotografia de l'any 1981, amb els mateixos punts de control que en la ortofoto de l'any 2015



**Figura 17:** Fotografia aèria de l'any 1981 on es poden veure una sèrie de punts de control. Font: Base cartogràfica ICGC.





**Figura 18:** Ortofoto de l'any 2015 on es poden veure una sèrie de punts de control, els mateixos que els visualitzats per a la fotografia georeferenciar. Font: Base cartogràfica ICGC.

Una vegada finalitzat el procediment d'afegir els punts de control es visualitza la taula de punts de control, la qual permet analitzar l'error mitja quadràtic total del procés (RMS Error).

Link								
			Total RMS Error:		Forward: 15,8975			
	Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
<input checked="" type="checkbox"/>	1	796964,932909	4642086,247647	796975,251680	4642110,853946	4,02371	14,5157	15,063
<input checked="" type="checkbox"/>	2	796787,846930	4641682,889549	796798,800702	4641701,304585	8,62172	7,81339	11,6354
<input checked="" type="checkbox"/>	3	796375,406277	4640890,061319	796372,212140	4640898,821730	3,77895	-3,66539	5,26455
<input checked="" type="checkbox"/>	4	796654,904518	4639552,336129	796644,981345	4639563,675998	-10,2166	8,25838	13,1369
<input checked="" type="checkbox"/>	5	797019,500242	4637080,152004	797026,339296	4637062,436863	-3,3058	-5,46278	6,38516
<input checked="" type="checkbox"/>	6	796886,870699	4638414,570826	796899,749147	4638407,634137	6,54021	-2,14391	6,88263
<input checked="" type="checkbox"/>	7	797457,252760	4639380,392373	797479,611140	4639376,857742	3,08474	4,34567	5,32921
<input checked="" type="checkbox"/>	8	796941,138435	4642365,266379	796957,256449	4642400,455977	10,5262	23,5894	25,8313
<input checked="" type="checkbox"/>	9	797127,907315	4643056,775913	797121,232298	4643037,150584	-16,3102	-31,8373	35,772
<input checked="" type="checkbox"/>	10	796918,485815	4642066,431459	796931,975461	4642090,028550	8,27808	13,0006	15,4124
<input checked="" type="checkbox"/>	11	796589,618915	4641342,552733	796581,784020	4641342,328224	-5,67383	-11,8789	13,1644
<input checked="" type="checkbox"/>	12	796793,674552	4641327,531868	796788,820892	4641323,145894	-7,505	-13,3767	15,3382
<input checked="" type="checkbox"/>	13	797161,580232	4641508,593900	797170,959365	4641510,524185	-1,84217	-3,158	3,65603

☒ Auto Adjust      Transformation: 1st Order Polynomial (Affine)   
☐ Degrees Minutes Seconds      Forward Residual Unit : Unknown

**Figura 19:** Taula on es mostra el RMS Error sense corregir.

Es pot observar que el RMS és bastant elevat, això indica que els punts que s'han utilitzat no s'ajusten suficientment al model de transformació (polinomial de primer ordre). Per tant, el que farem a continuació és canviar el model de transformació a un *adjust*. El que fa l'*adjust* es fer coincidir els punts introduïts, en el nostre cas, la fotografia de l'any 1981 amb els altres punts de control extrets de la fotografia actual, amb l'objectiu de què les coordenades de punts siguin exactament iguals i que es puguin aconseguir bones unions entre els dos punts.

Com es pot observar, després de fer el procediment de l'*adjust* es pot veure com ha corregit els errors en el punts de control i com el RMS ha quedat amb un valor baix i, per tant, indica que el valor d'error ja és mínim.

Link									
				Total RMS Error:		Forward:2,72098			
	Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual	
<input checked="" type="checkbox"/>	1	796964,932909	4642086,247647	796975,251680	4642110,853946	0	0	0	
<input checked="" type="checkbox"/>	2	796787,846930	4641682,889549	796798,800702	4641701,304585	0	0	0	
<input checked="" type="checkbox"/>	3	796375,406277	4640890,061319	796372,212140	4640898,821730	6,97209	6,30238	9,39841	
<input checked="" type="checkbox"/>	4	796654,904518	4639552,336129	796644,981345	4639563,675998	0	0	0	
<input checked="" type="checkbox"/>	5	797019,500242	4637080,152004	797026,339296	4637062,436863	-2,81227	0,0991131	2,81402	
<input checked="" type="checkbox"/>	6	796886,870699	4638414,570826	796899,749147	4638407,634137	0	0	0	
<input checked="" type="checkbox"/>	7	797457,252760	4639380,392373	797479,611140	4639376,857742	0	0	0	
<input checked="" type="checkbox"/>	8	796941,138435	4642365,266379	796957,256449	4642400,455977	0	0	0	
<input checked="" type="checkbox"/>	9	797127,907315	4643056,775913	797121,232298	4643037,150584	0	0	0	
<input checked="" type="checkbox"/>	10	796918,485815	4642066,431459	796931,975461	4642090,028550	0	0	0	
<input checked="" type="checkbox"/>	11	796589,618915	4641342,552733	796581,784020	4641342,328224	0	0	0	
<input checked="" type="checkbox"/>	12	796793,674552	4641327,531868	796788,820892	4641323,145894	0	0	0	
<input checked="" type="checkbox"/>	13	797161,580232	4641508,593900	797170,959365	4641510,524185	0	0	0	

☒ Auto Adjust      Transformation: Adjust   
☐ Degrees Minutes Seconds      Forward Residual Unit : Unknown

**Figura 20:** Taula on es mostra el RMS Error corregir després de fer l'*adjust*.

L'últim pas serà el *rectify*, amb aquest es crearà un nou *dataset raster*<sup>12</sup> que permetrà guardar la nova ortofoto de l'any 1981, ja georeferenciada, amb les coordenades i la referència espacial que hem donat anteriorment. Una cop fet aquest pas, ja tindrem emmagatzemada tota la informació i la ortofoto georeferenciada amb un nou *dataset*, amb un arxiu de tipus *Tiff*<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> Conjunt de dades geoespacial format per un o més *rasters* o imatges. (Diccionari terminològic de sistemes d'informació geogràfica, 2012)

<sup>13</sup> *Tagged Image File Format*: format d'emmagatzematge d'imatges desenvolupat per la firma Aldus (Adobe Systems) que utilitza etiquetes i capçalera per descriure el contingut del fitxer, aquest pot contenir una o múltiples imatges, imatges RGB o pseudocolor, imatges amb compressió o sense, etc. La característica principal del format *TIFF* és que

### **3.2.4. Cartografia d'unitats morfològiques**

En aquest apartat s'utilitzen les ortofotos aèries del ICGC i les fotografies pròpies per la identificació visual de les unitats morfològiques que s'han seleccionat per realitzar la cartografia per a totes les sèries disponibles. A continuació, es mostren les descripcions de les unitats morfològiques usades en el treball.

---

la compressió s'efectua sense pèrdues, de forma que es pot editar sempre el contingut complert original de la imatge. (Diccionari terminològic de sistemes d'informació geogràfica, 2012).



### Classificació unitats morfològiques

- **Llera:** és el lloc topogràficament de menor altitud (més baix) per on circulen les aigües d'un riu en situació de cabals baixos.



**Figura 21:** Ortofoto de l'any 2015. Font: Base cartogràfica del ICGC.



**Figura 22:** Llera del riu Noguera Ribagorçana. Font: Fotografia pròpia.



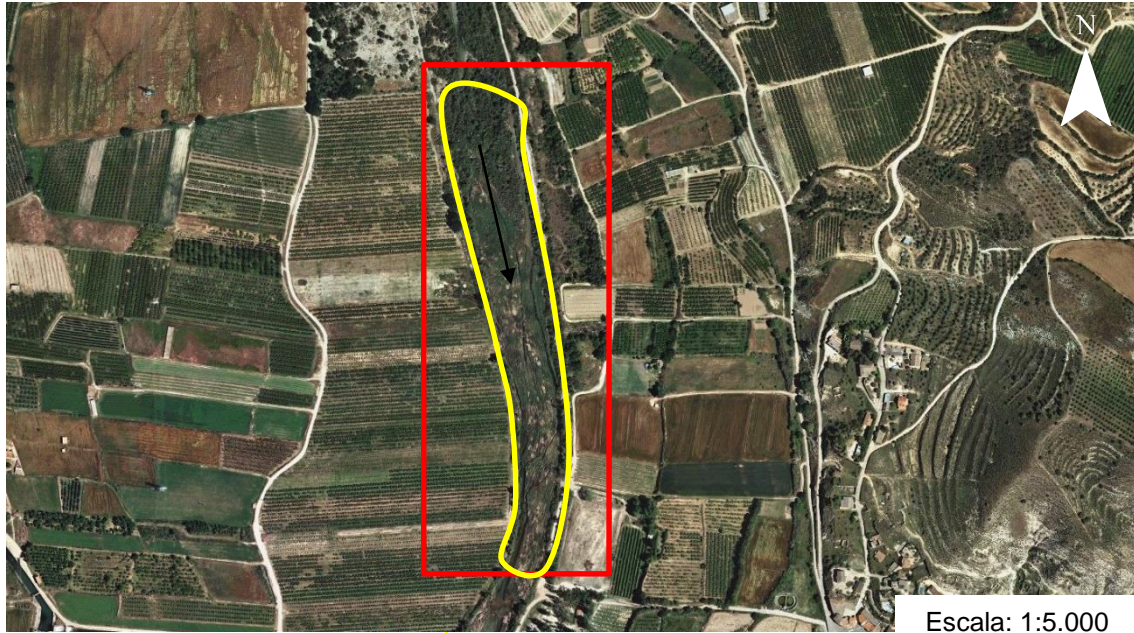
- **Àrea activa sense vegetació:** topogràficament està a un nivell més elevat que la llera i s'inunda freqüentment. Aquesta està formada per sediments com graves o còdols mòbils (habitualment), també pot contenir alguna illa amb vegetació o vegetació herbàcia.



**Figura 23:** Ortofoto de l'any 1945. Font: Base cartogràfica del ICGC.



- **Àrea activa parcialment vegetada:** topogràficament està a un nivell més elevat que la llera, també s'inunda freqüentment però la mobilitat dels sediments es molt baixa (estabilitat). És on apareix la vegetació associada a medis humits, com per exemple: la Boga o el Canyís.



**Figura 24:** Ortofoto de l'any 2015. Font: Base cartogràfica del ICGC.



**Figura 25:** Àrea activa parcialment vegetada del riu Noguera Ribagorçana. Font: Fotografia pròpia.



- **Illes de vegetació:** són unitats vegetades estables situades dins de la llera, a les àrees actives.



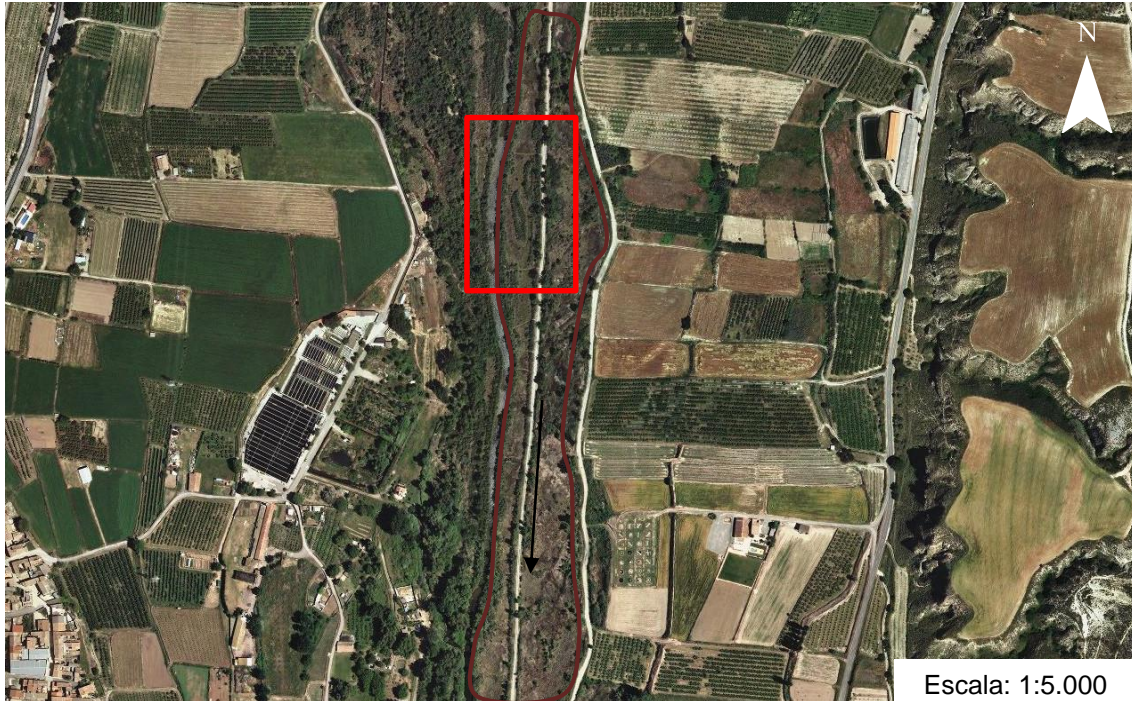
**Figura 26:** Ortofoto de l'any 2015. Font: Base cartogràfica del ICGC.



**Figura 27:** Illes de vegetació del riu Noguera Ribagorçana. Font: Fotografia pròpia.



- **Plana d'inundació:** és la part adjacent a la llera que està formada per sediments com graves o còdols, o vegetació. S'inunda en períodes de cabal elevat però actualment es estable. Es aquests medis aigües avall de les preses, acostuma ser part de l'àrea activa de la llera que s'ha estabilitat i ha quedat desconnectada de la dinàmica contemporània.



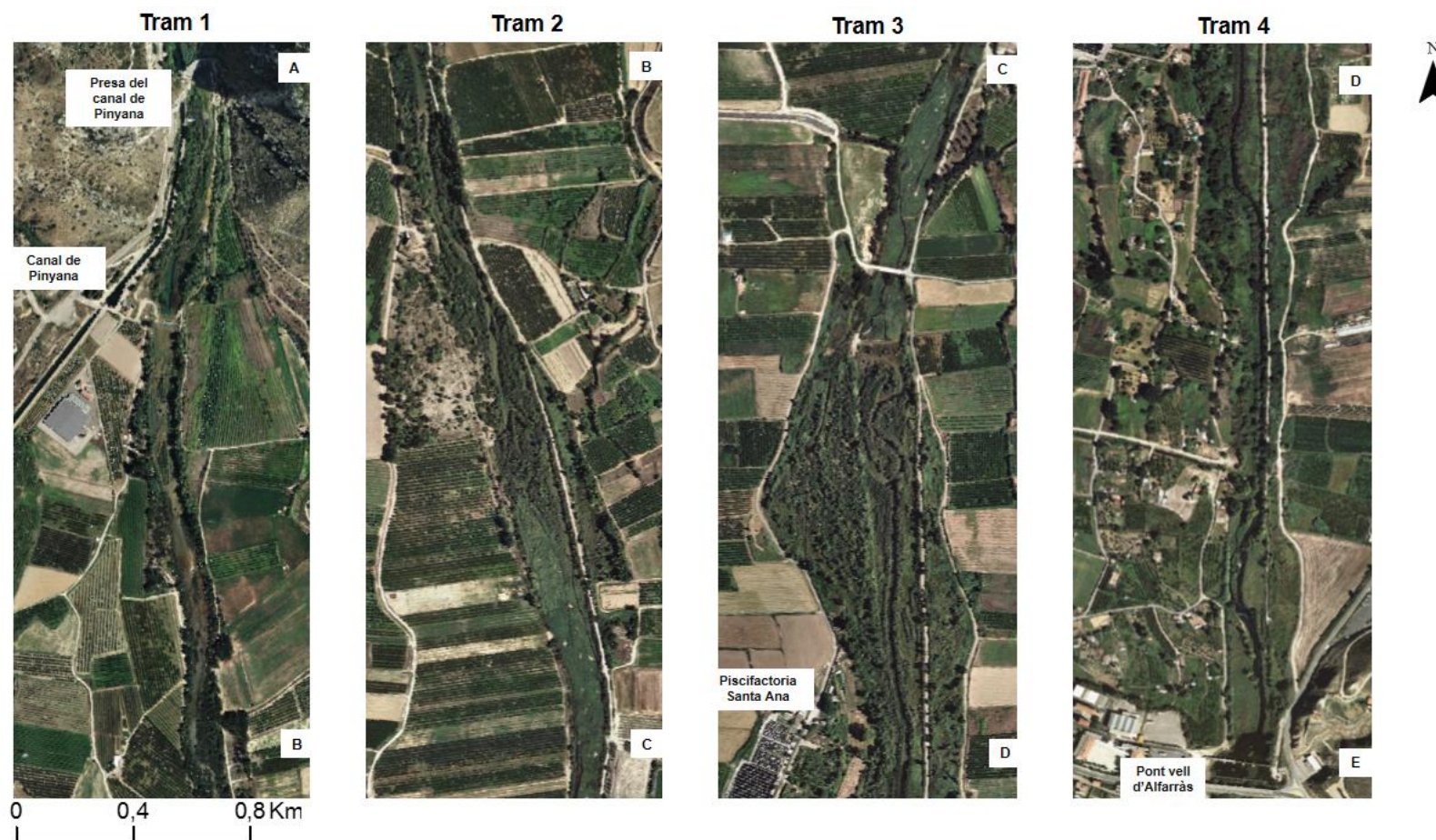
**Figura 28:** Ortofoto de l'any 2015. Font: Base cartogràfica del ICGC.



**Figura 29:** Plana d'inundació del riu Noguera Ribagorçana. Font: Fotografia pròpia.



La cartografia resultant de les anàlisis (identificació i cartografia de les unitats descrites anteriorment) s'ha fet pel conjunt de tot el tram d'estudi, però per tal de millorar la visualització el tram s'ha fragmentat en 4 blocs d'escala superior en la (Figura 30) les lletres A-B, B-C, C-D, D-E mostren l'inici i final de cada tram.

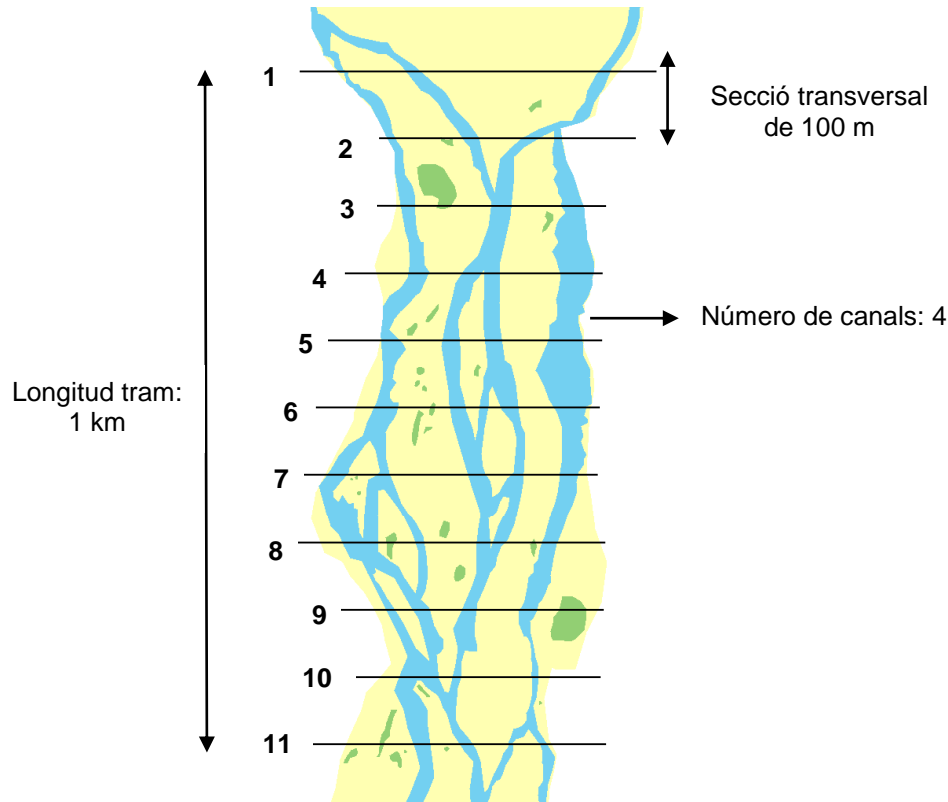


**Figura 30:** Tram d'estudi fragmentat en 4 trams. Font: Base cartogràfica del ICGC.

### 3.3. Càlculs d'índexs de complexitat morfològica

Els índexs de complexitat morfològica generalment analitzen característiques com: la llargada total dels canals en relació a la llargada del tram estudiat (sinuositat), la mida i la freqüència de les barres sedimentàries i, finalment, el número de canals en la llera estudiat. Aquest últim cas és el que utilitzarem en aquest treball.

En el nostre cas s'ha utilitzat l'índex de número o nombre de canals (Hong y Davis, 1979) en la llera que relaciona el número de canals en seccions d'anàlisi. Així, el que farem es comptar en diferents seccions d'anàlisi el número de canals que hi ha. Per al càlcul de l'índex de nombre de canals, al llarg del tram d'estudi s'ha utilitzat la metodologia presentada per Llena (2015). En el tram estudiat, de cinc quilòmetres de llargada, cada 100 metres s'ha realitzat una secció i, així, successivament, fins al final del tram. Per tant, tenim un total de 50 seccions distribuïdes en el nostre tram d'estudi. Per cadascuna de la secció s'ha calculat el nombre de canals.



**Figura 31:** Exemple de l'índex de multiplicitat en el tram d'estudi. Font: Elaboració pròpia.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

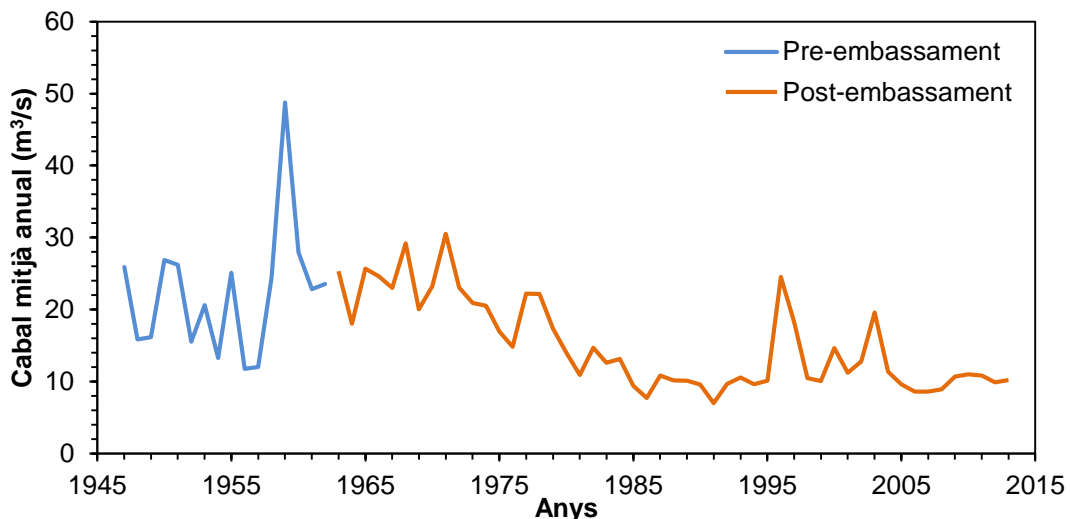
### 4.1. Canvis Hidrològics

En aquest apartat mostraré els resultats dels canvis hidrològics de la Noguera Ribagorçana, aigües avall, de la presa de Santa Ana<sup>14</sup>.

#### 4.1.1. Canvis en el règim de cabals mensuals i anuals

Tot seguit explicaré els canvis en les sèries de règim de cabals mitjans anuals i mensuals. Aquestes anàlisis s'han realitzat en dades de cabal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) i aportació ( $\text{hm}^3$ ). Tot i això, ambdós variables presenten els mateixos resultats.

Pel que fa al cabal mitjà anual (Figura 32) en el període pre-embassament s'observa una tendència en condicions naturals, amb nombroses variacions de cabal, fet que indica la gran variabilitat del riu en condicions naturals. Un cop construït l'embassament s'observa un canvi de tendència, malgrat això continuen produint-se fluctuacions de cabal en algunes puntes. Però la diferència és que aquest cabal és més esmorteït, ja que cada cop es va reduint més i esdevé més uniforme. Curiosament, els primers anys de funcionament de la presa s'observa un cabal mitjà molt semblant al del pre-embassament, però quan es redueix més es a partir del l'any 1980.



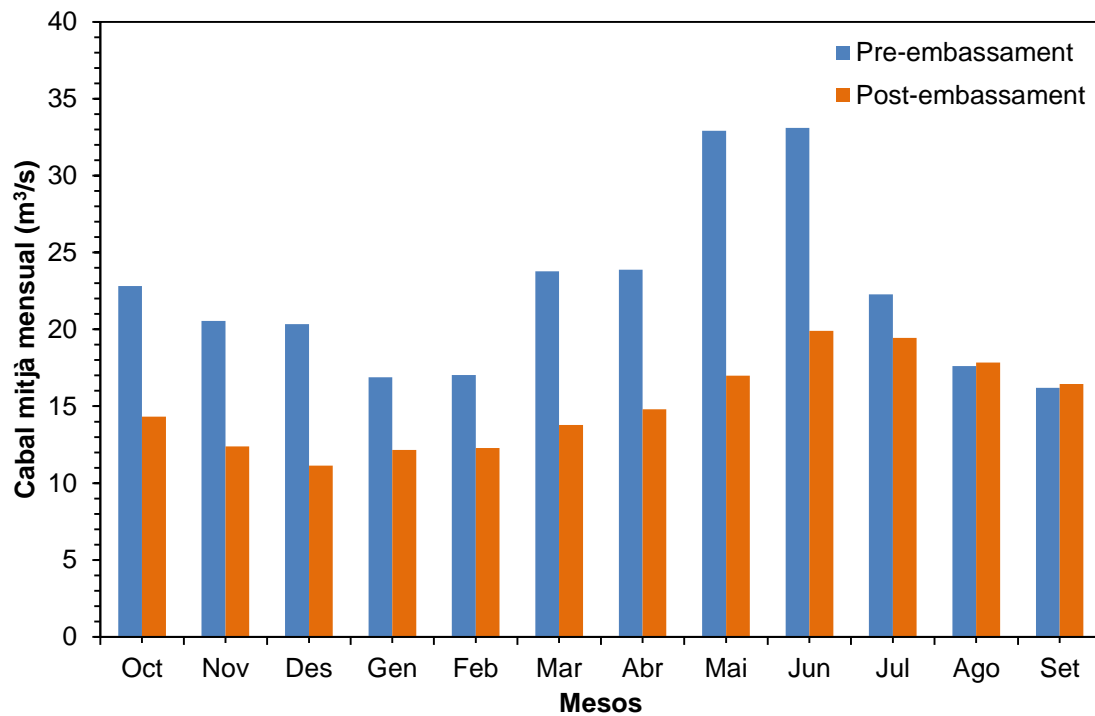
**Figura 32:** Cabal mitjà anual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX.

<sup>14</sup> Segons les dades disponibles de l'estació de Pinyana.



Pel que fa al règim mensual del riu Noguera Ribagorçana (Figura 33), abans de la construcció de l'embassament s'observa que el cabal té nombrosos alts i baixos, per tant, no és constant, segons l'època de l'any. El període de més aportació va de març a juny (principalment a la primavera), amb el màxim anual al mes de juny, a causa de la combinació del desgel a la capçalera o fusió nival i de les pluges de la primavera. També hi ha un pic al mes d'octubre i al novembre, pel període de pluges de tardor. Pel que fa al període de menys aportació mensual el trobem durant els mesos de gener i febrer, a causa de què la precipitació és en forma de neu i a la disminució de pluges, amb el mínim anual al mes de gener i, també, als mesos d'estiu, per la manca de precipitació. Cal destacar que el riu no presenta estiatges extrems perquè les elevades aportacions hídriques de la capçalera són d'origen pirinenc.

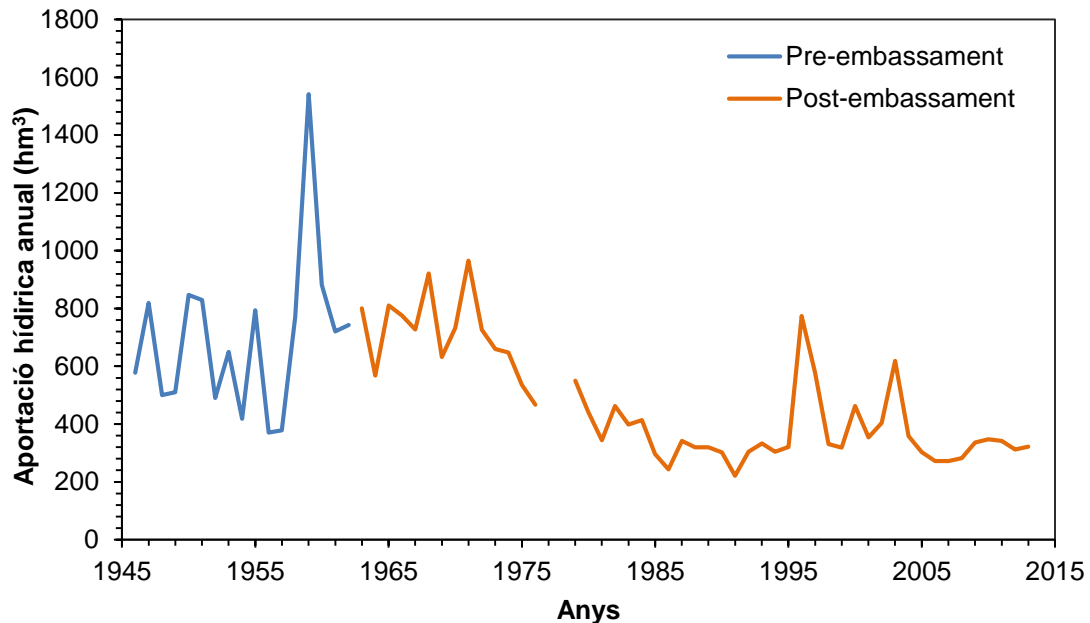
En canvi, una vegada construït l'embassament, el cabal és més constant, ja que es redueix l'amplitud dels cabals mensuals i ja no hi cap pic de cabal destacat (l'amplitud de cabals es de  $8 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Actualment, el cabal anual és estable i només canvia segons les demandes, ja que l'embassament provoca alteracions en la variabilitat mensual de les aportacions (del mes d'abril al setembre) a causa de la temporada de reg, que precisament és quan hi ha un increment del cabal del riu. I, en canvi, el mínim es segueix donant als mesos d'hivern que és quan hi ha menys aportacions hídriques a causa de les precipitacions en forma de neu a la capçalera i que no hi ha campanya de reg. Si comparem el mes de juny pre-embassament i post-embassament (mes amb el pic de cabal mensual) podem veure que el cabal mitjà mensual s'ha reduït un 38,3%.



**Figura 33:** Cabal mitjà mesual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX.

Observant la figura 34 i 35, s'observa que l'aportació mitjana anual i mensual segueix el mateix patró que el cabal mitjà, tal com és d'esperar a causa de la directa correlació d'ambdós variables. L'aportació mitja anual a Pinyana durant el període 1946-2013 és de 534,1 hm<sup>3</sup>. Tot i això, hi ha clares diferències entre períodes. L'aportació mitjana en els anys pre-embassament és de 696,7 hm<sup>3</sup>, i en els anys posteriors és de 466,8 hm<sup>3</sup>, per tant, la reducció és del 33%. Aquesta reducció és major aigües avall, un cop s'han captat els volums d'aigua per al canal de Pinyana i encara més aigües avall del canal d'Algerri-Balaguer (just al límit del tram d'estudi). Aproximadament, el cabal mitjà d'aquestes tomes és de 11,7 m<sup>3</sup>/s al canal de Pinyana (segons informació al web de la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre) i d'entre 3-5 m<sup>3</sup>/s en el canal d'Algerri-Balaguer en els moments de bombeig (segons informació al web del Sistema Automático de Información Hidrológica de la Cuenca Hidrográfica del Ebro). Com es pot veure al gràfic, després de la construcció de l'embassament de Santa Ana s'aprecia una clara disminució de l'aportació hídrica anual, a més de veure el paper regulador que té l'embassament, així doncs d'un màxim de 1541 hm<sup>3</sup> abans de l'embasament, es passa a un màxim de 773 hm<sup>3</sup> una vegada construït

l'embassament, per tant, s'ha reduït la magnitud dels valors màxims registrats un 50%.

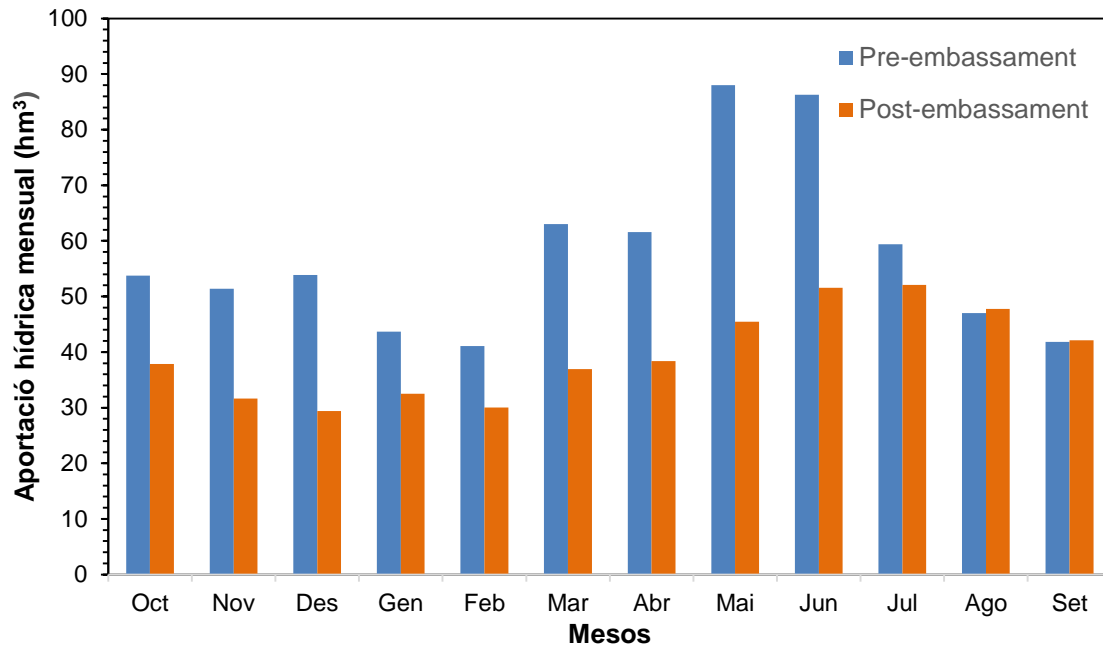


**Figura 34:** Aportació hídrica anual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX.

Gràcies a l'aportació hídrica podem calcular l'índex de regulació (IR), aquest índex serveix com a indicador de la capacitat d'alteració hidrològica i de regulació dels embassament sobre el règim natural de cabals. Aquest índex va estar desenvolupat per primer cop per Batalla et al. (2004). El IR és el quocient entre la capacitat del embassament i l'aportació mitja anual, expressat com un valor adimensional, però assimilable al temps de residència de l'aigua en l'embassament (Tuset et al. 2015). En el nostre cas, l'embassament de Santa Ana té una capacitat de 238 hm³ i, l'aportació mitjana anual és de 534,1 hm³, per tant l'índex de regulació és de 0,44, en altres paraules, l'embassament pot regular un 44% del cabal que rep. Segon l'estudi de López i García (2003) el sistema d'embassaments d'Escales, Canelles i Santa Ana, tenen un índex de regulació de 1,56. Això vol dir que aquests tres embassaments tenen una major capacitat d'emmagatzematge que la mitjana anual d'aportació hídrica del riu.

Estudis com el de Tuset et al. (2015) conclouen que l'embassament d'Oliana regula el cabal del Segre, alterant el seu règim natural de cabals, sobretot en la temporada de reg. Aquesta gestió dels cabals té com a resultat que la diferència entre l'aportació mensual màxima i mínima s'hagi reduït un 23% i que la

variabilitat dels cabals diaris s'hagi disminuït un 11%, similar tendències a les obtingudes en aquest estudi.

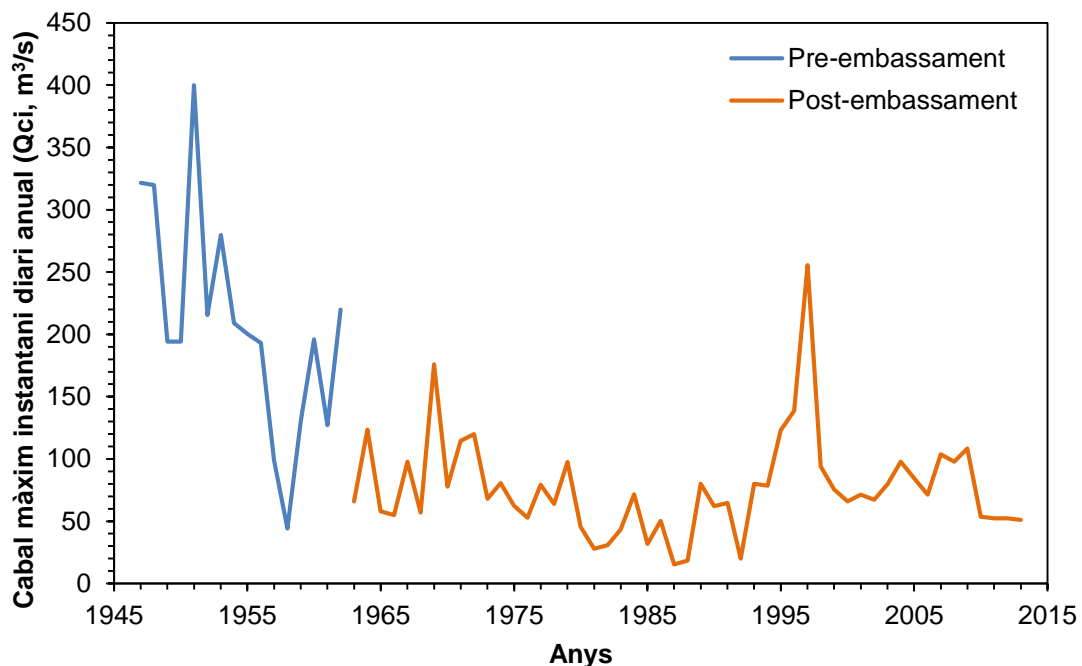


**Figura 35:** Aportació hídrica mensual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX.

#### 4.1.2. Canvis en la freqüència i magnitud de les riudes

A continuació mostraré els canvis en la freqüència i magnitud dels cabals màxims instantanis anuals i mensuals.

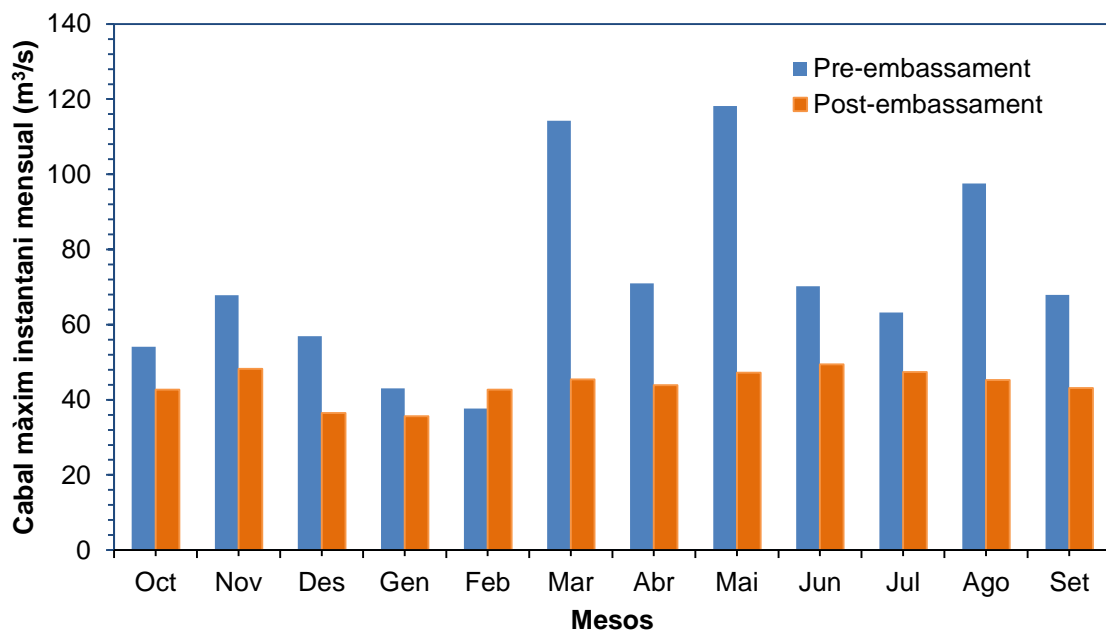
El cabal màxim instantani ( $Q_{ci}$ ) ens indica la magnitud de les crescudes, concretament mesura el pic de cabal que s'ha produït durant un període de temps determinat, normalment un any i, per tant, són útils per a l'anàlisi de la freqüència i magnitud de les crescudes. Com podem veure a la figura 36, el  $Q_{ci}$  ha sofert en general una disminució important com a conseqüència de la construcció de l'embassament de Santa Ana i de la regulació per part dels embassaments aigües amunt de la conca, ja que recordem que aigües amunt de Santa Ana trobem els embassaments d'Escales i Canelles. Com podem observar, en el període post-embassament només es produeix una crescuda considerable, però no arriba ni de bon tros a la magnitud de la crescuda de l'any 1951, la qual cosa ens indica l'alta capacitat de laminació i reducció de les crescudes del embassament. A nivell general, el  $Q_{ci}$  mitjà per al període pre-embassament és de  $209 \text{ m}^3/\text{s}$ , mentre que per al període post-embassament és de  $76.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , el que significa una reducció del 63%.



**Figura 36:** Cabal màxim instantani diari anual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX.

L'anàlisi del cabals màxims instantanis mensuals ens permet estudiar si aquesta reducció és constant en tots els mesos o són alguns els que han tingut un impacte més important a causa de què ja eren els mesos on hi ha havia més probabilitat de succeir una crescuda o avinguda. La figura 37 mostra com una vegada construït l'embassament, gairebé durant tot l'any es registren els mateixos valors, amb la qual cosa ens indica una regulació molt forta de la magnitud de les crescudes. Com es pot observar si comparem els valors pre-embassament i post-embassament, el mes que ha sofert canvis de major magnitud és el març i el maig (reducció del 60% de la magnitud), mentre que al febrer, el cabal màxim post-embassament és superior al pre-embassament, el que significa un canvi oposat al observat de manera generalitzada (pre-embassament 37,7 m<sup>3</sup>/s i post-embassament 42,7 m<sup>3</sup>/s). Al gener, en canvi, hi ha la menor reducció, al voltant d'un 19%.

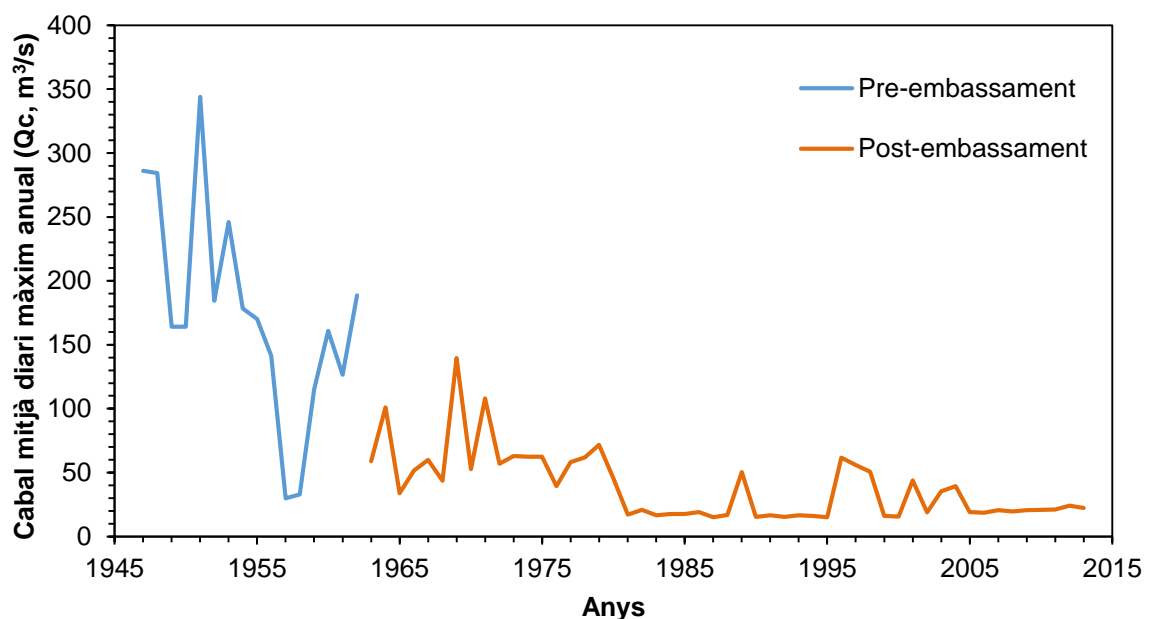
Com a dades destacables que corroboren l'efecte de la reducció de la magnitud de les crescudes un cop construït l'embassament de Santa Ana, podem destacar que el Qci a Pinyana l'any 1907 vas ser de 1800 m<sup>3</sup>/s i l'any 1937 de 1400 m<sup>3</sup>/s (López Bustos, 1972), clarament superiors als valors registrats al període post-embassaments.



**Figura 37:** Cabal màxim instantani mensual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX.

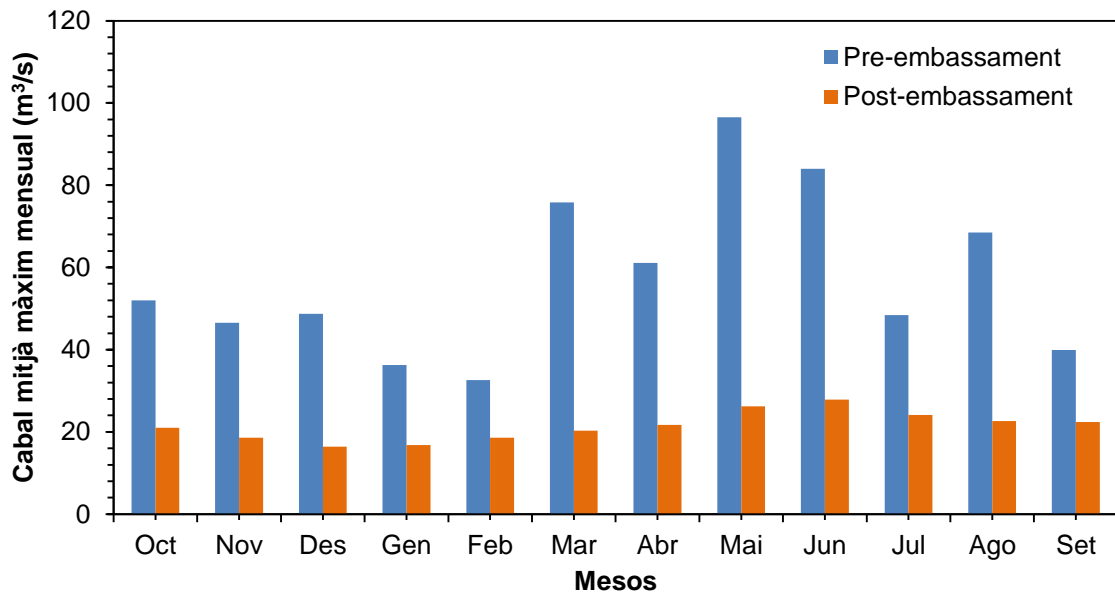
El cabal mitjà màxim diari anual ( $Q_c$ ) no representa un valor instantani, fa referència a la mitjana diària màxima enregistrada durant un any i, per tant, sempre serà d'una magnitud inferior que el pic d'una crescuda o avinguda. La diferència entre el  $Q_c$  i el  $Q_{ci}$  vindrà donada per les característiques de la crescuda, entre elles la durada i magnitud.

L'evolució del  $Q_c$  (Figura 38) ens mostra molt millor l'efecte que té l'embassament en el fet de la regulació del cabal, en aquets cas els cabals de crescuda. En el període pre-embassament la mitjana del  $Q_c$  es situa al voltant dels  $344 \text{ m}^3/\text{s}$  i amb molts alts i baixos en diferents anys. Però un cop construït l'embassament, s'observa un regulació molt forta on cada cop menys hi ha oscil·lacions i on els últims anys sobretot, a partir de l'any 2004, s'observa que el valor del  $Q_c$  queda més o menys estable. Si comparem el  $Q_c$  mitjà pre-embassament amb el post-embassament, veiem que la reducció ha estat del 77,9%. Una xifra més que destacable i que ens corrobora l'alteració del règim de cabals per l'efecte de l'embassament aigües amunt. A més, aquest valor és superior al 63% de reducció del  $Q_{ci}$ , el que ens indica que la presa no altera tan sols el pic de la crescuda sinó també la forma d'aquestes, fet que condiciona més al valor del  $Q_c$  que al valor del  $Q_{ci}$ .



**Figura 38:** Cabal mitjà diari màxim anual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX.

Aquests resultats també s'observen quan s'estudia el comportament del Qc però a escala mensual (Figura 39). En aquest cas es veu clarament que una vegada construït l'embassament el Qc mensual és el mateix gairebé durant tot l'any ja que presenta mínimes oscil·lacions. La màxima reducció mensual del Qc la trobem al mes de maig on el Qc es redueix un 72,9%.



**Figura 39:** Cabal mitjà màxim mensual. Font: Elaboració pròpia mitjançant les dades del anuari d'aforaments del CEDEX.

Com a conclusió podem dir que l'embassament té una gran capacitat de reducció de la magnitud de les crescudes, a més d'una capacitat de modificar la forma d'aquestes. La reducció del cabal màxim instantani anual és superior al 60% i tan sols es registren crescudes de magnitud moderada en períodes on la disponibilitat d'aigua es abundant, sent la resposta d'episodis generalitzats de pluges o episodis extrems.

### **Anàlisi de freqüència i magnitud: períodes de retorn**

Tot seguit mostraré les dades obtingudes per fer l'estudi dels períodes de retorn. En el nostre cas utilitzarem tres períodes: el període 1947–2013 que és la totalitat de la sèrie que tenim disponible i, després, els períodes pre-embassament 1947–1962 i el post-embassament 1962–2013. La taula 4, 5 i 6 mostra els resultats per a les tres funcions de probabilitat utilitzades.



**Taula 4:** Període 1947-2013. Font: Elaboració pròpia.

Rang			Weibull		Gringorten		D.
	Any	m³/s	P(x)	T(x)	P(x)	T(x)	Estàndard
1	1947	321,55	0,01	68,0	0,01	119,9	45465,3
2	1948	319,88	0,03	34,0	0,02	43,0	44755,4
3	1949	194,13	0,04	22,7	0,04	26,2	7363,2
4	1950	194,13	0,06	17,0	0,05	18,9	7363,2
5	1951	400	0,07	13,6	0,07	14,7	85075,7
6	1952	215,44	0,09	11,3	0,08	12,1	11473,6
7	1953	279,77	0,10	9,7	0,10	10,2	29395,1
8	1954	209,05	0,12	8,5	0,11	8,9	10145,1
9	1955	200,40	0,13	7,6	0,13	7,8	8477,9
10	1956	193	0,15	6,8	0,14	7,0	7170,3
11	1957	99	0,16	6,2	0,16	6,4	86,9
12	1958	44	0,18	5,7	0,17	5,8	4137,4
13	1959	131	0,19	5,2	0,19	5,3	514,3
14	1960	196	0,21	4,9	0,20	4,9	7687,3
15	1961	127	0,22	4,5	0,22	4,6	348,8
16	1962	219,93	0,24	4,3	0,23	4,3	12455,8
17	1963	66	0,25	4,0	0,25	4,1	1791,2
18	1964	123,5	0,26	3,8	0,26	3,8	230,4
19	1965	58,1	0,28	3,6	0,28	3,6	2522,5
20	1966	55	0,29	3,4	0,29	3,4	2843,3
21	1967	97,7	0,31	3,2	0,31	3,3	112,8
22	1968	57	0,32	3,1	0,32	3,1	2634,0
23	1969	175,8	0,34	3,0	0,34	3,0	4553,2
24	1970	78	0,35	2,8	0,35	2,8	926,8
25	1971	114,4	0,37	2,7	0,37	2,7	36,9
26	1972	120	0,38	2,6	0,38	2,6	136,4
27	1973	67,9	0,40	2,5	0,40	2,5	1634,0
28	1974	80,6	0,41	2,4	0,41	2,4	768,5
29	1975	62,4	0,43	2,3	0,43	2,4	2108,9
30	1976	52,8	0,44	2,3	0,44	2,3	3085,0

31	1977	79,2	0,46	2,2	0,46	2,2	848,1
32	1978	63,8	0,47	2,1	0,47	2,1	1982,3
33	1979	97,6	0,49	2,1	0,49	2,1	114,5
34	1980	45,5	0,50	2,0	0,50	2,0	3951,7
35	1981	27,9	0,51	1,9	0,51	1,9	6472,6
36	1982	30,6	0,53	1,9	0,53	1,9	6034,6
37	1983	43,4	0,54	1,8	0,54	1,8	4209,7
38	1984	71,6	0,56	1,8	0,56	1,8	1350,0
39	1985	31,7	0,57	1,7	0,57	1,7	5877,1
40	1986	50,4	0,59	1,7	0,59	1,7	3355,0
41	1987	15,3	0,60	1,7	0,60	1,7	8649,5
42	1988	18,5	0,62	1,6	0,62	1,6	8071,7
43	1989	80,0	0,63	1,6	0,63	1,6	801,0
44	1990	62,0	0,65	1,5	0,65	1,5	2144,9
45	1991	64,7	0,66	1,5	0,66	1,5	1904,7
46	1992	20,0	0,68	1,5	0,68	1,5	7793,8
47	1993	80,0	0,69	1,4	0,69	1,4	801,0
48	1994	78,6	0,71	1,4	0,71	1,4	885,8
49	1995	123	0,72	1,4	0,72	1,4	215,4
50	1996	138,8	0,74	1,4	0,74	1,4	925,8
51	1997	255,5	0,75	1,3	0,75	1,3	21646,5
52	1998	93,9	0,76	1,3	0,77	1,3	207,4
53	1999	75,4	0,78	1,3	0,78	1,3	1083,9
54	2000	66,0	0,79	1,3	0,80	1,3	1790,4
55	2001	71,3	0,81	1,2	0,81	1,2	1374,4
56	2002	67,3	0,82	1,2	0,83	1,2	1681,2
57	2003	79,9	0,84	1,2	0,84	1,2	805,6
58	2004	97,7	0,85	1,2	0,86	1,2	112,8
59	2005	84,4	0,87	1,2	0,87	1,1	574,7
60	2006	71,4	0,88	1,1	0,89	1,1	1366,2
61	2007	103,7	0,90	1,1	0,90	1,1	21,4
62	2008	97,7	0,91	1,1	0,92	1,1	112,8
63	2009	108,3	0,93	1,1	0,93	1,1	0,0

64	2010	53,7	0,94	1,1	0,95	1,1	2988,0
65	2011	52,3	0,96	1,0	0,96	1,0	3134,0
66	2012	52,3	0,97	1,0	0,98	1,0	3138,5
67	2013	51	0,99	1,0	0,99	1,0	3285,9
	Cabal mitjà	<b>108,32</b>					6194,2 <b>78,7</b>

Taula 5: Període 1947–1962. Font: Elaboració pròpia.

Rang			Weibull		Gringorten		D. Estàndard
	Any	m <sup>3</sup> /s	P(x)	T(x)	P(x)	T(x)	
1	1947	321,55	0,06	17,0	0,03	28,8	12663,3
2	1948	319,88	0,12	8,5	0,10	10,3	12290,0
3	1949	194,13	0,18	5,7	0,16	6,3	221,6
4	1950	194,13	0,24	4,3	0,22	4,5	221,6
5	1951	400	0,29	3,4	0,28	3,5	36474,5
6	1952	215,44	0,35	2,8	0,34	2,9	41,2
7	1953	279,77	0,41	2,4	0,41	2,5	5006,3
8	1954	209,05	0,47	2,1	0,47	2,1	0,0
9	1955	200,40	0,53	1,9	0,53	1,9	74,3
10	1956	193	0,59	1,7	0,59	1,7	256,5
11	1957	99	0,65	1,5	0,66	1,5	12103,7
12	1958	44	0,71	1,4	0,72	1,4	27230,6
13	1959	131	0,76	1,3	0,78	1,3	6086,6
14	1960	196	0,82	1,2	0,84	1,2	169,4
15	1961	127	0,88	1,1	0,90	1,1	6726,8
16	1962	219,93	0,94	1,1	0,97	1,0	119,1
	Cabal mitjà	<b>209,02</b>					7480,4 <b>86,5</b>

**Taula 6:** Període 1962–2013. Font: Elaboració pròpia.

Rang			Weibull		Gringorten		D. Estàndard
	Any	m³/s	P(x)	T(x)	P(x)	T(x)	
1	1963	66	0,02	52,0	0,01	91,3	115,2
2	1964	123,5	0,04	26,0	0,03	32,8	2187,2
3	1965	58,1	0,06	17,3	0,05	20,0	347,2
4	1966	55	0,08	13,0	0,07	14,4	472,3
5	1967	97,7	0,10	10,4	0,09	11,2	439,7
6	1968	57	0,12	8,7	0,11	9,2	389,4
7	1969	175,8	0,13	7,4	0,13	7,8	9814,4
8	1970	77,9	0,15	6,5	0,15	6,8	1,3
9	1971	114,4	0,17	5,8	0,17	6,0	1418,9
10	1972	120	0,19	5,2	0,19	5,3	1872,1
11	1973	67,9	0,21	4,7	0,21	4,8	78,0
12	1974	80,6	0,23	4,3	0,23	4,4	15,0
13	1975	62,4	0,25	4,0	0,25	4,1	205,4
14	1976	52,8	0,27	3,7	0,27	3,8	573,7
15	1977	79,2	0,29	3,5	0,28	3,5	6,1
16	1978	63,8	0,31	3,3	0,30	3,3	167,2
17	1979	97,6	0,33	3,1	0,32	3,1	436,4
18	1980	45,5	0,35	2,9	0,34	2,9	977,9
19	1981	27,9	0,37	2,7	0,36	2,8	2387,5
20	1982	30,6	0,38	2,6	0,38	2,6	2124,5
21	1983	43,4	0,40	2,5	0,40	2,5	1108,4
22	1984	71,6	0,42	2,4	0,42	2,4	26,5
23	1985	31,7	0,44	2,3	0,44	2,3	2031,5
24	1986	50,4	0,46	2,2	0,46	2,2	693,4
25	1987	15,3	0,48	2,1	0,48	2,1	3771,5
26	1988	18,5	0,50	2,0	0,50	2,0	3393,3
27	1989	80,0	0,52	1,9	0,52	1,9	10,8
28	1990	62,0	0,54	1,9	0,54	1,9	216,7
29	1991	64,7	0,56	1,8	0,56	1,8	145,3
30	1992	20,0	0,58	1,7	0,58	1,7	3214,0

31	1993	80,0	0,60	1,7	0,60	1,7	10,8
32	1994	78,6	0,62	1,6	0,62	1,6	3,3
33	1995	123	0,63	1,6	0,64	1,6	2140,7
34	1996	138,8	0,65	1,5	0,66	1,5	3846,2
35	1997	255,5	0,67	1,5	0,68	1,5	31940,1
36	1998	93,9	0,69	1,4	0,70	1,4	295,4
37	1999	75,4	0,71	1,4	0,72	1,4	1,8
38	2000	66,0	0,73	1,4	0,73	1,4	115,0
39	2001	71,3	0,75	1,3	0,75	1,3	30,1
40	2002	67,3	0,77	1,3	0,77	1,3	88,6
41	2003	79,9	0,79	1,3	0,79	1,3	10,3
42	2004	97,7	0,81	1,2	0,81	1,2	439,7
43	2005	84,4	0,83	1,2	0,83	1,2	58,0
44	2006	71,4	0,85	1,2	0,85	1,2	28,9
45	2007	103,7	0,87	1,2	0,87	1,1	727,3
46	2008	97,7	0,88	1,1	0,89	1,1	439,7
47	2009	108,3	0,90	1,1	0,91	1,1	998,4
48	2010	53,7	0,92	1,1	0,93	1,1	532,3
49	2011	52,3	0,94	1,1	0,95	1,1	595,0
50	2012	52,3	0,96	1,0	0,97	1,0	596,9
51	2013	51	0,98	1,0	0,99	1,0	662,1
	Cabal mitjà	<b>76,73</b>					1611,8
							<b>40,15</b>

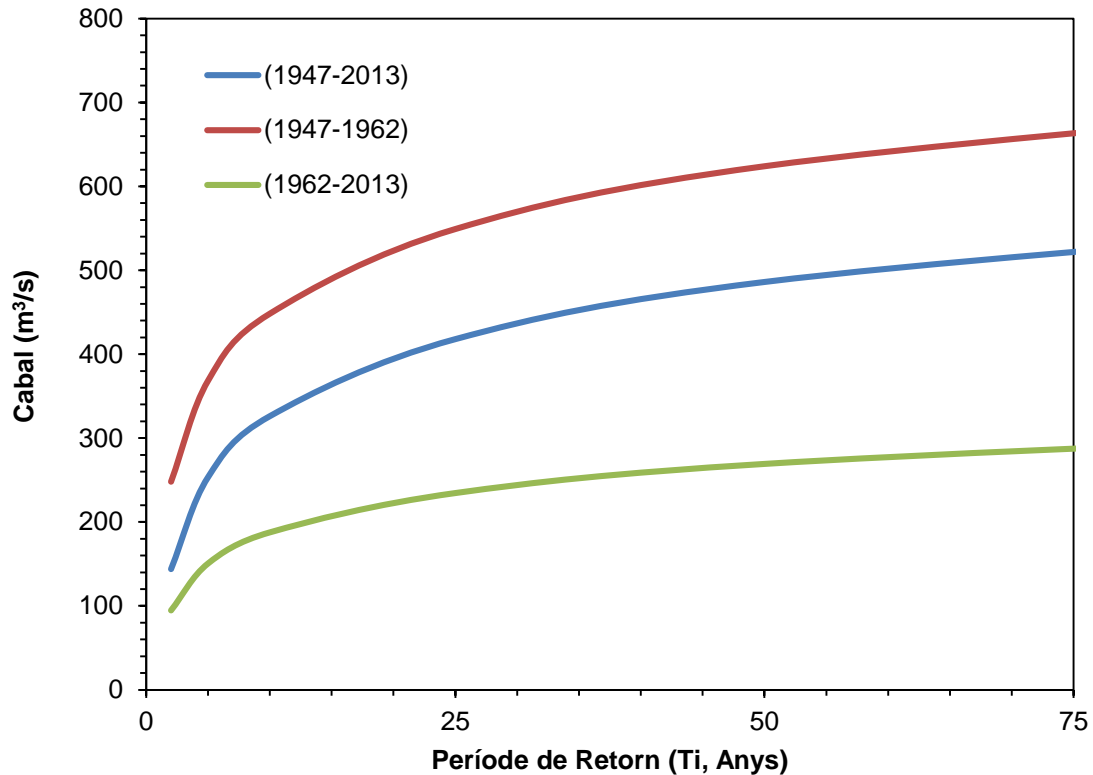
Gràcies a aquestes funcions es pot calcular quin és el valor de cabal associat a diferents períodes de retorn al riu Noguera Ribagorçana aigües avall de la presa de Santa Ana.

D'aquests càlculs podem concloure que les distribucions de Weibull i Gringorten són les que presenten més discrepàncies en els valors més elevats. Per exemple, al cabal màxim registrat l'any 1947, que és de 321,5 m<sup>3</sup>/s, podem veure que el període de retorn per Weibull és de 68 anys i, en canvi per Gringorten és de 120 anys. Un diferència més que destacable. I per contra, a mesura que el cabal va disminuint els valors poc a poc es van tornant semblants i fins i tot iguals.

La taula 7 mostra els valors de cabal associat a períodes de retorn de 2, 5, 10, 25, 50 i 100 anys (T2, T5, T10, T25, T50 i T100) segons els resultats obtinguts amb la distribució de Gumbel, mentre que la figura 40 mostra la representació gràfica de cada període estudiat. Per a l'anàlisi de l'evolució dels períodes de retorn utilitzaré aquesta distribució per facilitar la interpretació dels resultats i a causa de què és àmpliament utilitzada en la literatura i en estudis tècnics. Tot i això, tal i com he dit anteriorment, els valors específics per cada període de retorn poden canviar en funció de la distribució que s'utilitza. Per últim, es destaca que qualsevol valor associat a un període de retorn de longitud superior a la longitud de la base de dades presenta un seguit d'incerteses de càlcul que s'han de tenir en compte per a la seva utilització.

**Taula 7:** Períodes de retorn del cabals amb la llei de Gumbel. Font: Elaboració pròpia.

<b>T</b>	<b>(1947-2013)</b>	<b>(1947-1962)</b>	<b>(1962-2013)</b>
<b>2</b>	143,8	248,0	94,8
<b>5</b>	253,5	368,6	150,8
<b>10</b>	326,2	448,4	187,9
<b>25</b>	418,0	549,3	234,7
<b>50</b>	486,1	624,1	269,4
<b>100</b>	553,6	698,4	303,9



**Figura 40:** Distribució de Gumbel. Font: Elaboració pròpia.

Per comparar els resultats ens centrarem en dos períodes de retorn, 2 i 25 anys. En el primer dels casos (T2) em refereixo a crescudes recurrents, freqüents, mentre que el segon dels casos (T25) fa referència a crescudes de major magnitud però menys freqüents. La corba per al conjunt del període d'estudi es situa al mig de les obtingudes per al període pre i post-embassaments. El cabal per als períodes T2 i T25 són de 143,8 i 418,0 m<sup>3</sup>/s respectivament. Per suposat, els valors canvien si fragmentem la base de dades tenint en compte la construcció de l'embassament. Si es té en compte la base de dades pre-embassament el cabal associat a un T2 és de 248 m<sup>3</sup>/s, mentre que el de T25 es de 549,3 m<sup>3</sup>/s, un 72,5% i 31,4% superior als valors per al conjunt de la sèrie. Aquestes diferències donen peu a concloure que la selecció del període a analitzar és determinant en l'anàlisi de magnitud freqüència de crescudes tot i que els efectes sobre els episodis de menor freqüència però de major magnitud és menor. Pel contrari, en la sèrie post-embassaments els cabals associats a tots els períodes de retorn analitzats són significativament inferiors. En el cas del T2, la reducció respecte el valor pre-embassament és del 61,8%, mentre que la reducció del T25 és del 57,3%. Tal i com mostra la taula 7 la reducció és major

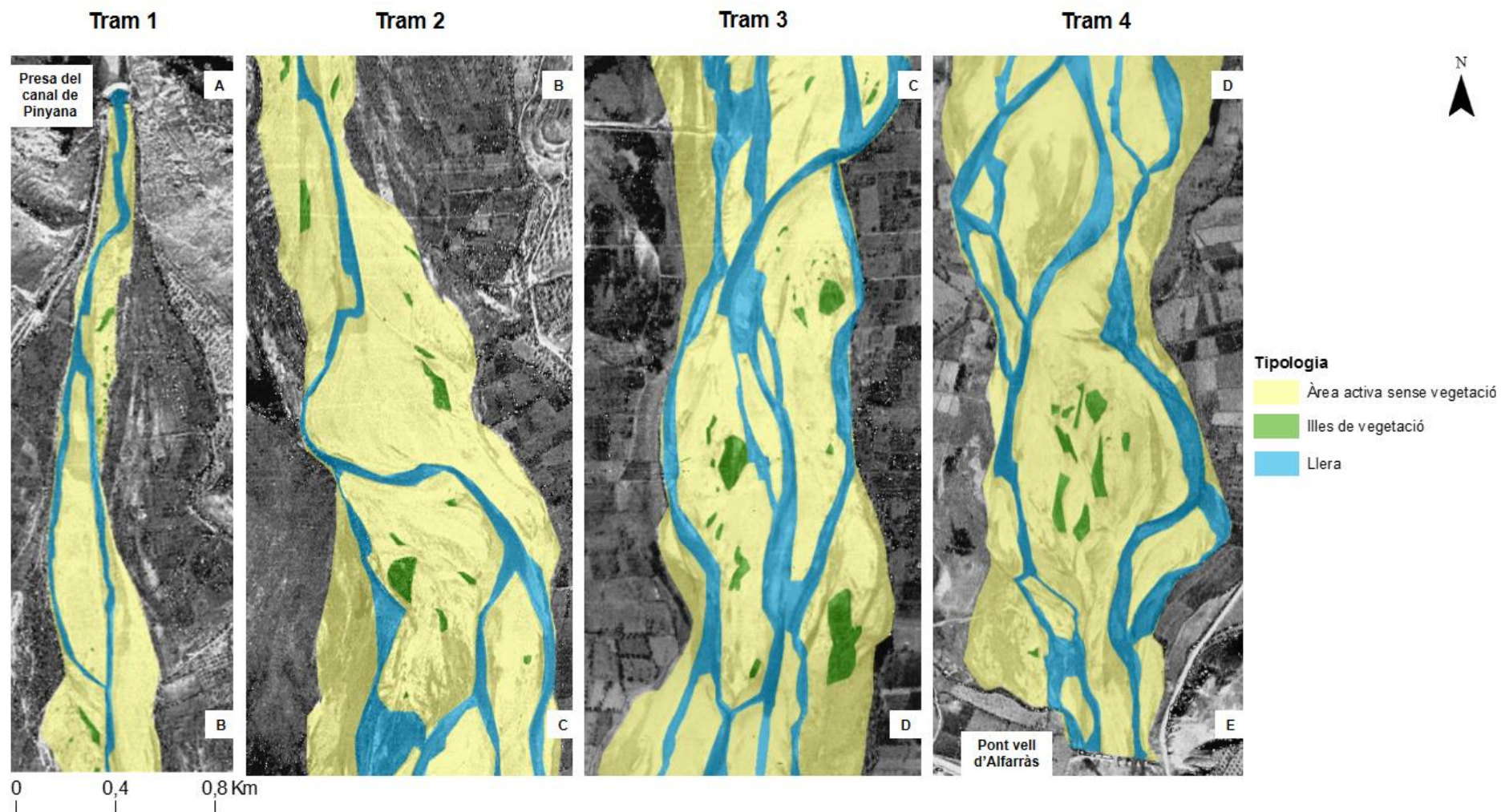


per els cabals de menor magnitud (T2) i, en canvi, és menor per les crescudes de major magnitud (T50). Aquests comportaments han estat també observats per Batalla et al. (2004) i Vericat i Batalla (2004) per al cas del riu Ebre.

El treball de Lòpez Moreno et al. (2003) indica que els embassaments a la Noguera Ribagorçana poden arribar a reduir, en conjunt, en un 80% el pic d'una crescuda esperable per un període de retorn de 50 anys.

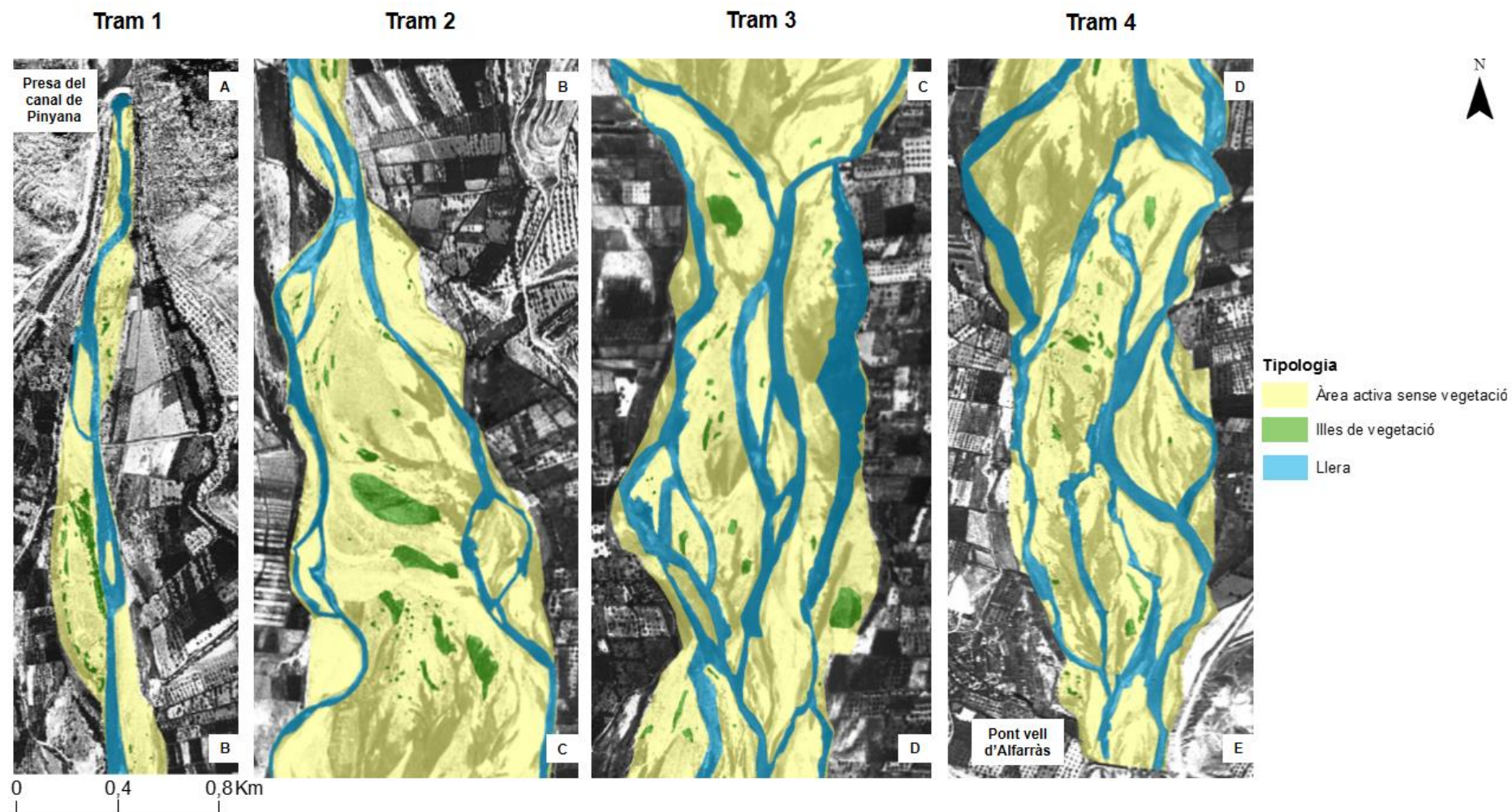
#### **4.2. Canvis morfològics**

Les figures de la 41 a la 48 mostren els resultats de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades en aquets estudi per cada un dels anys analitzats. A més a més, la figura 49 mostra l'evolució morfològica del conjunt del tram d'estudi al llarg del període analitzat. Per últim, la figura 50 mostra els resultats per al període inicial i final, sense tenir en compte l'evolució. Els resultats indiquen una clara reducció de les àrees actives de la llera, a l'igual que la simplificació del patró d'aquesta.

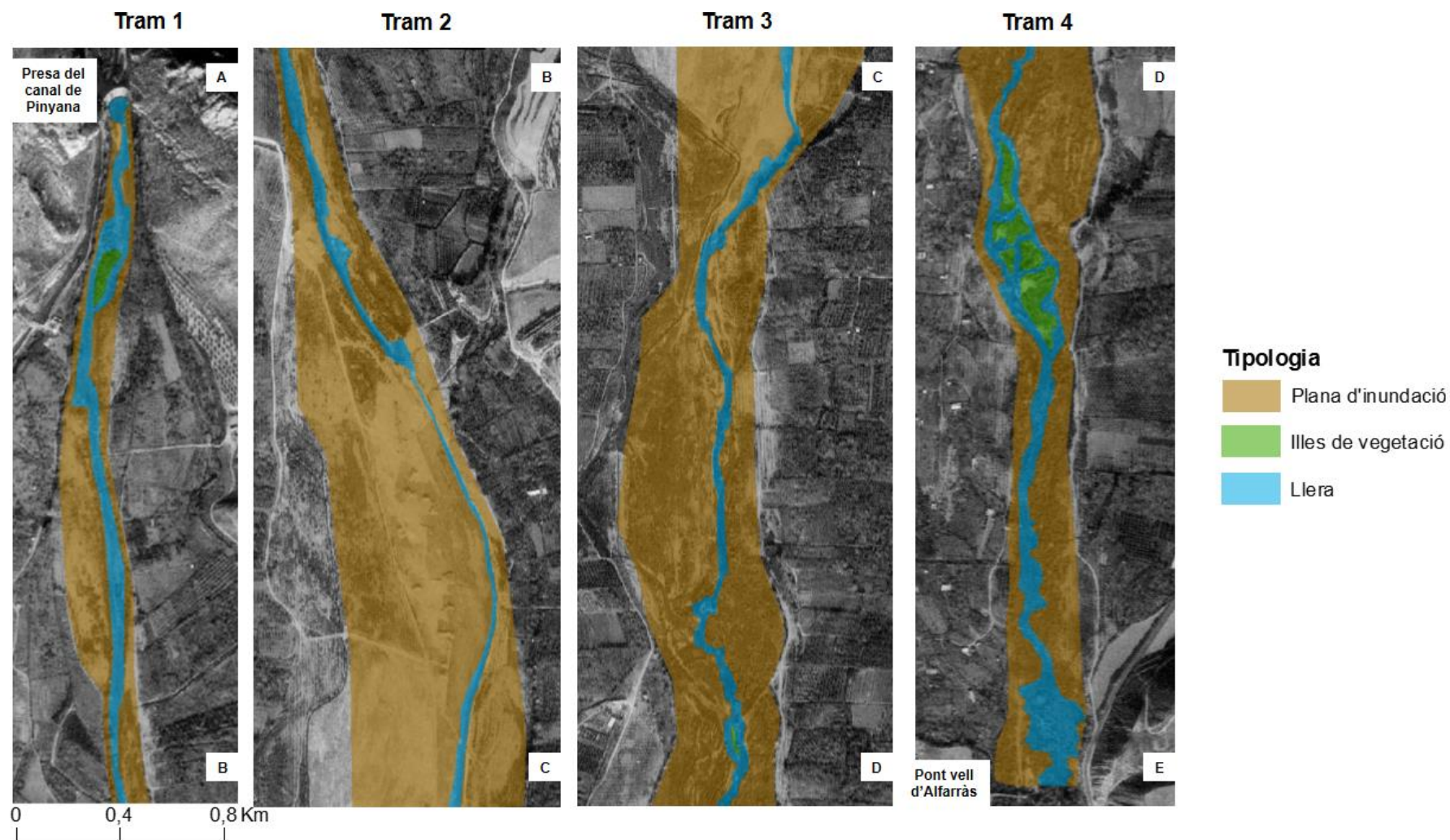


**Figura 41:** Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 1945. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC.



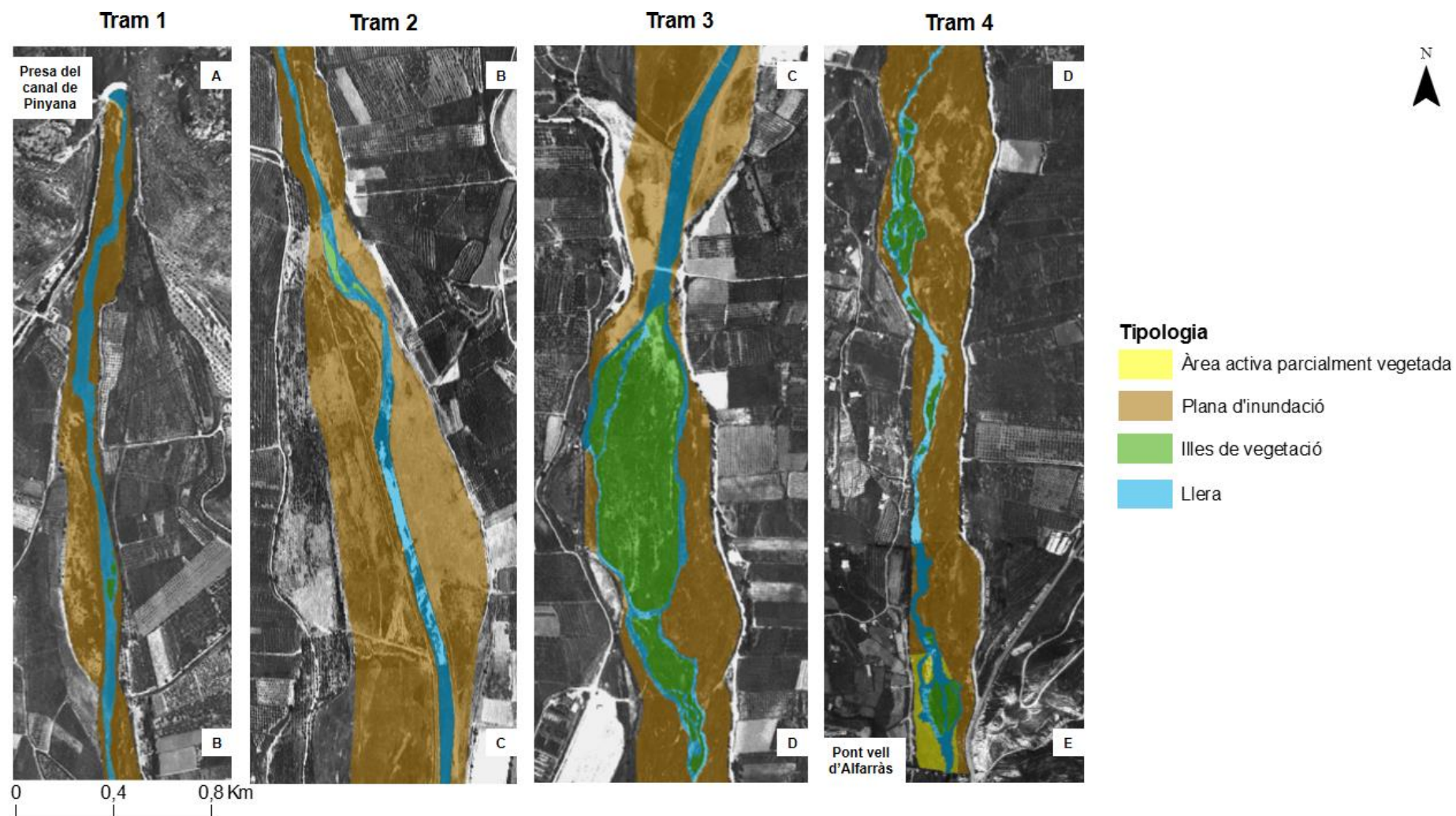


**Figura 42:** Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 1956. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC.

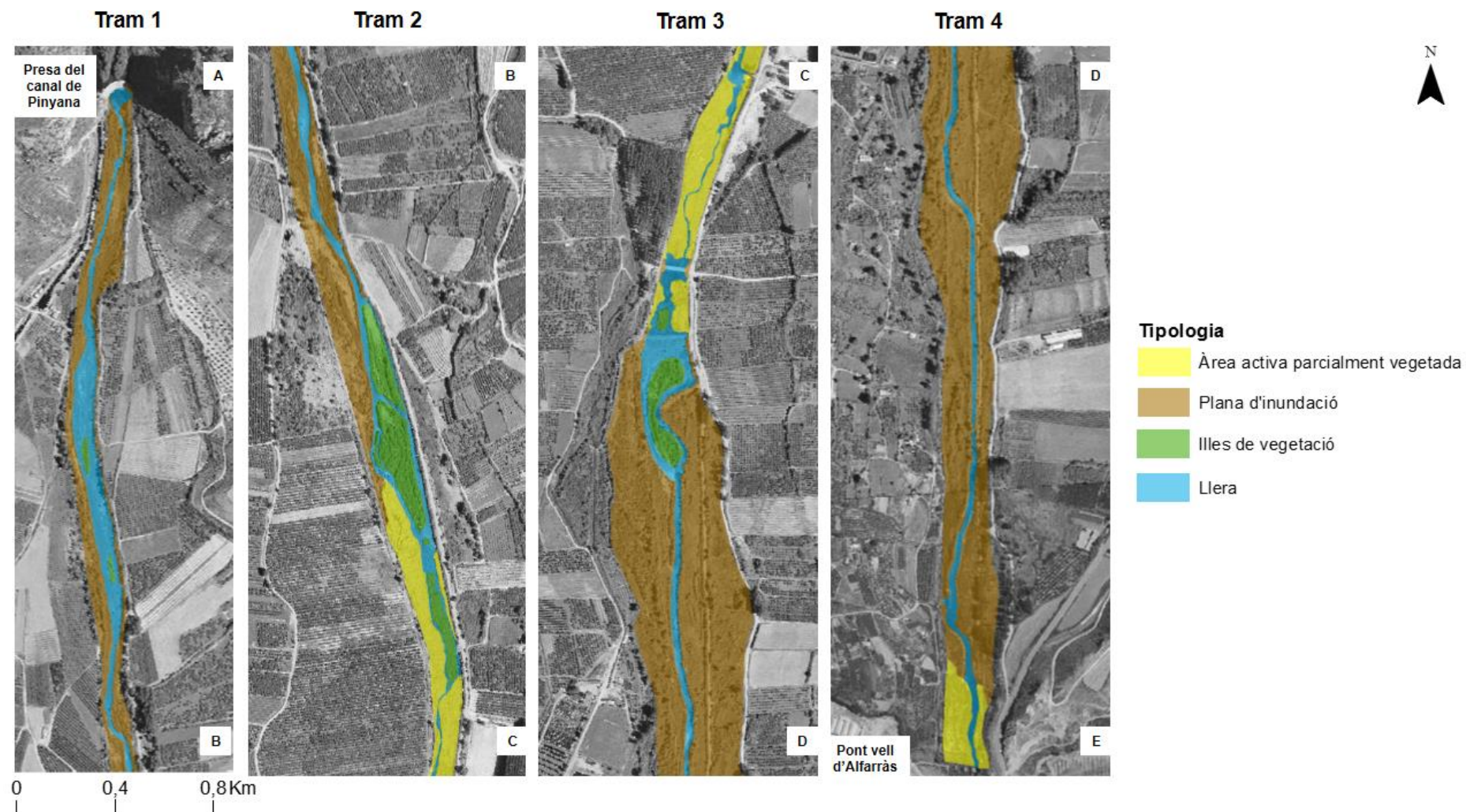


**Figura 43:** Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 1981. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del IGN.



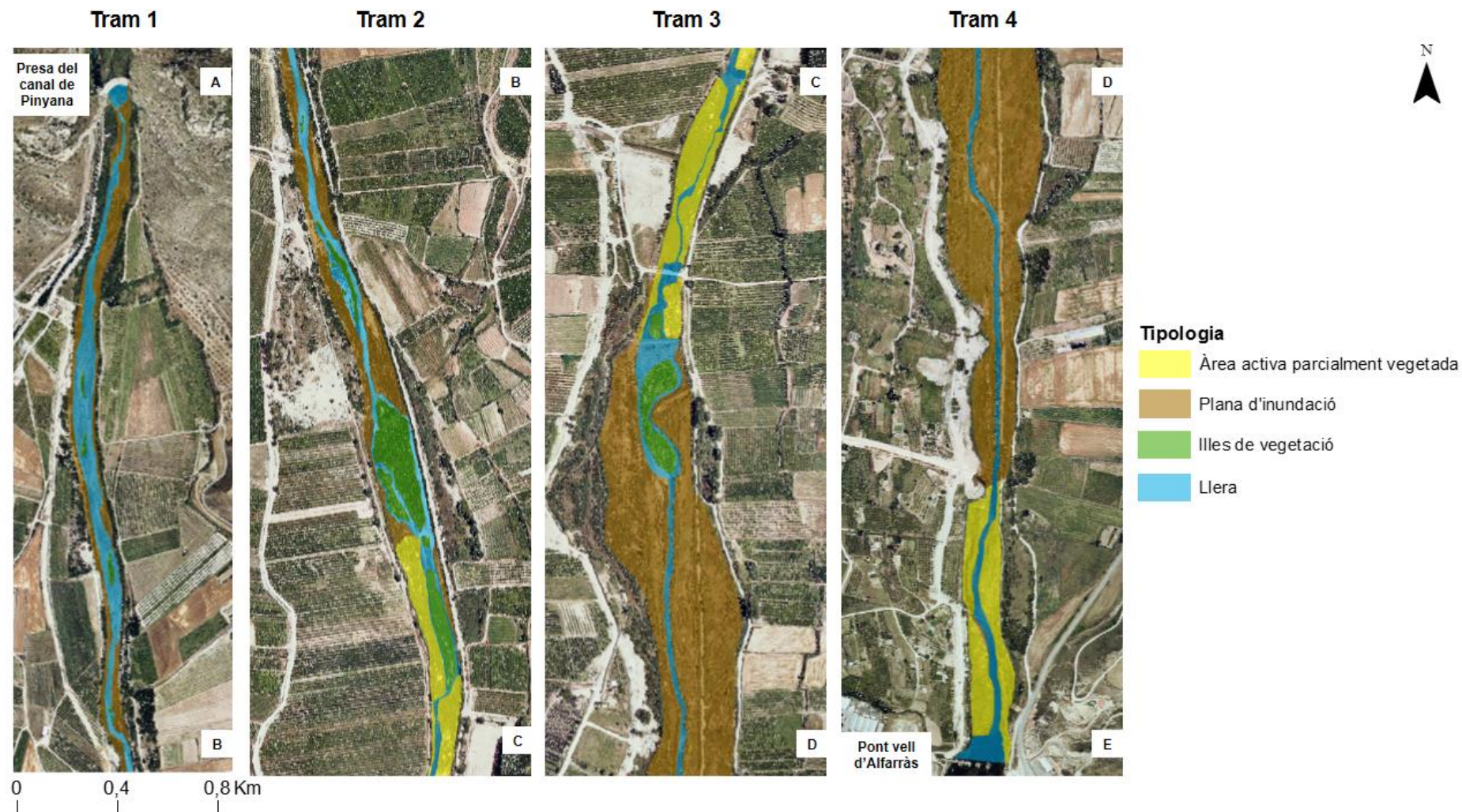


**Figura 44:** Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 1987. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC.



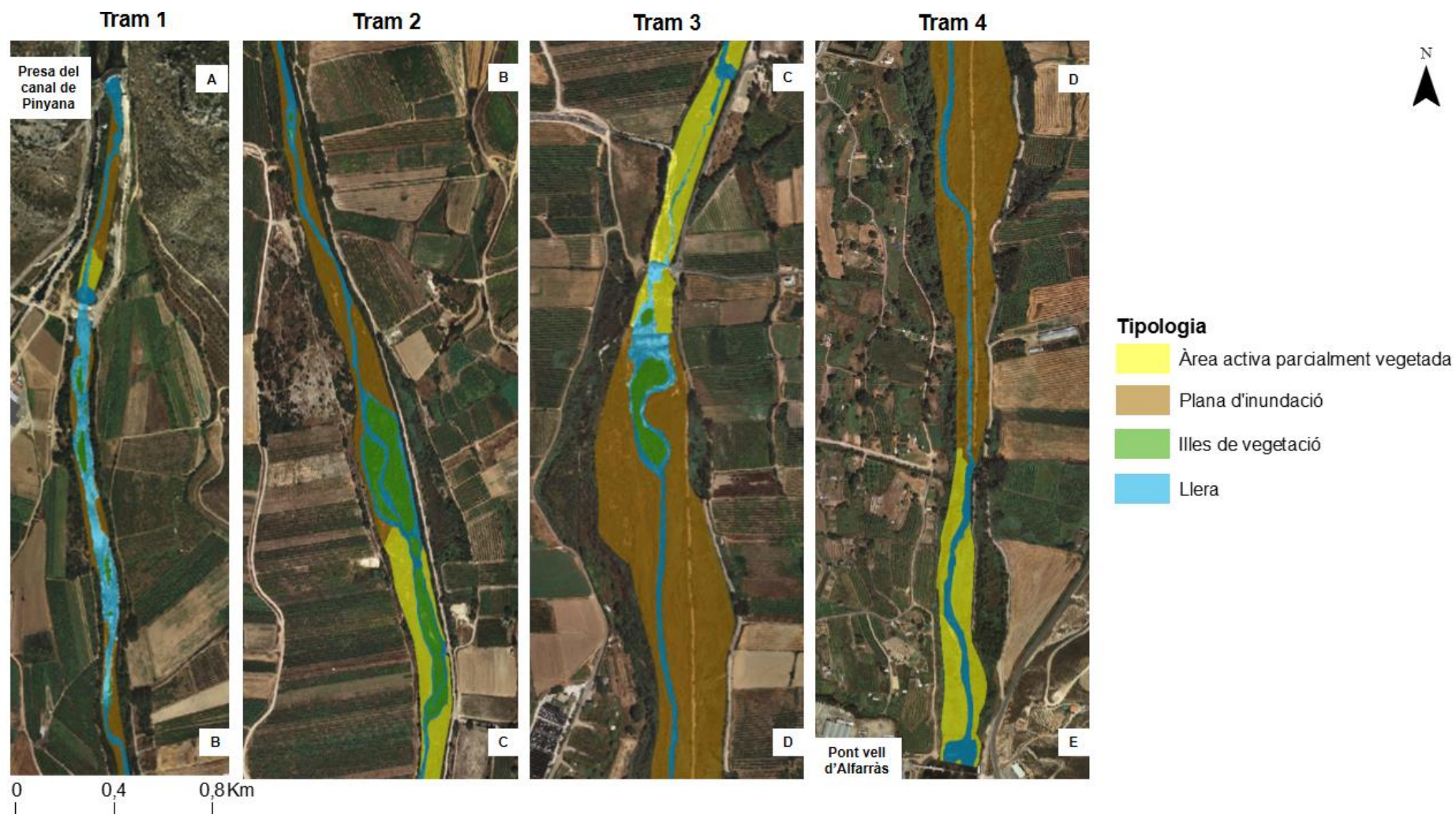
**Figura 45:** Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 1996. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC.



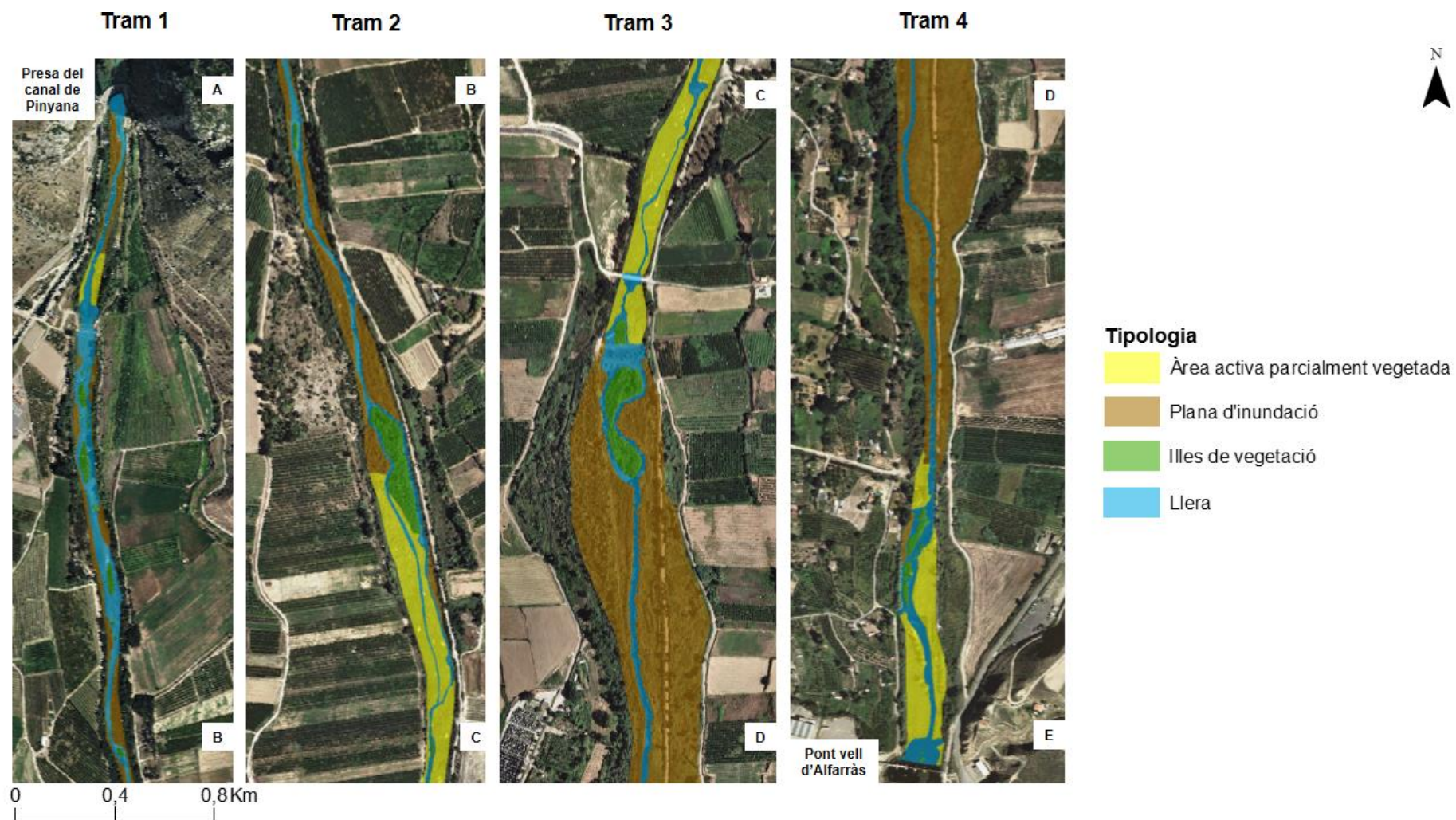


**Figura 46:** Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 2002. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC.



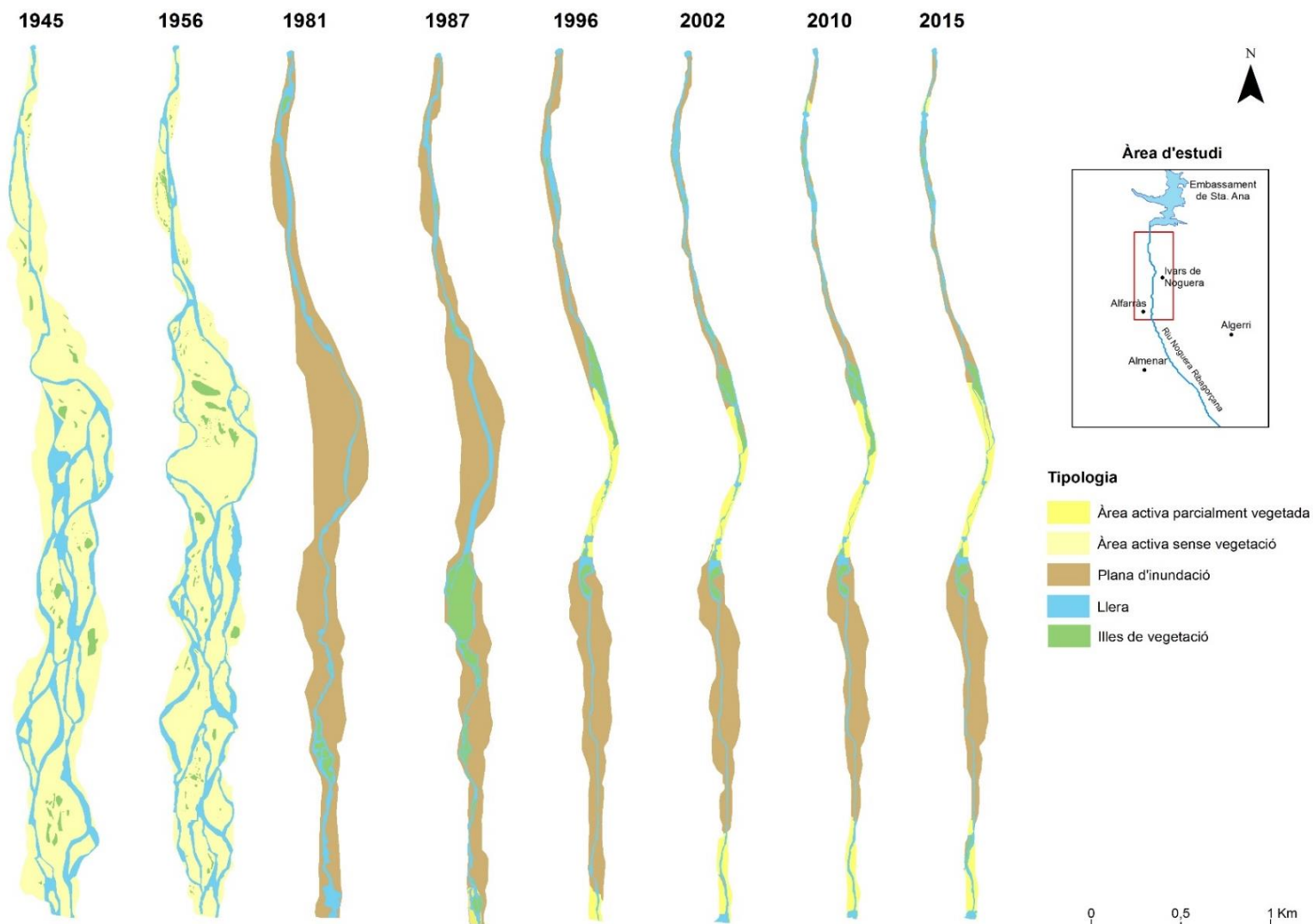


**Figura 47:** Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 2010. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC.

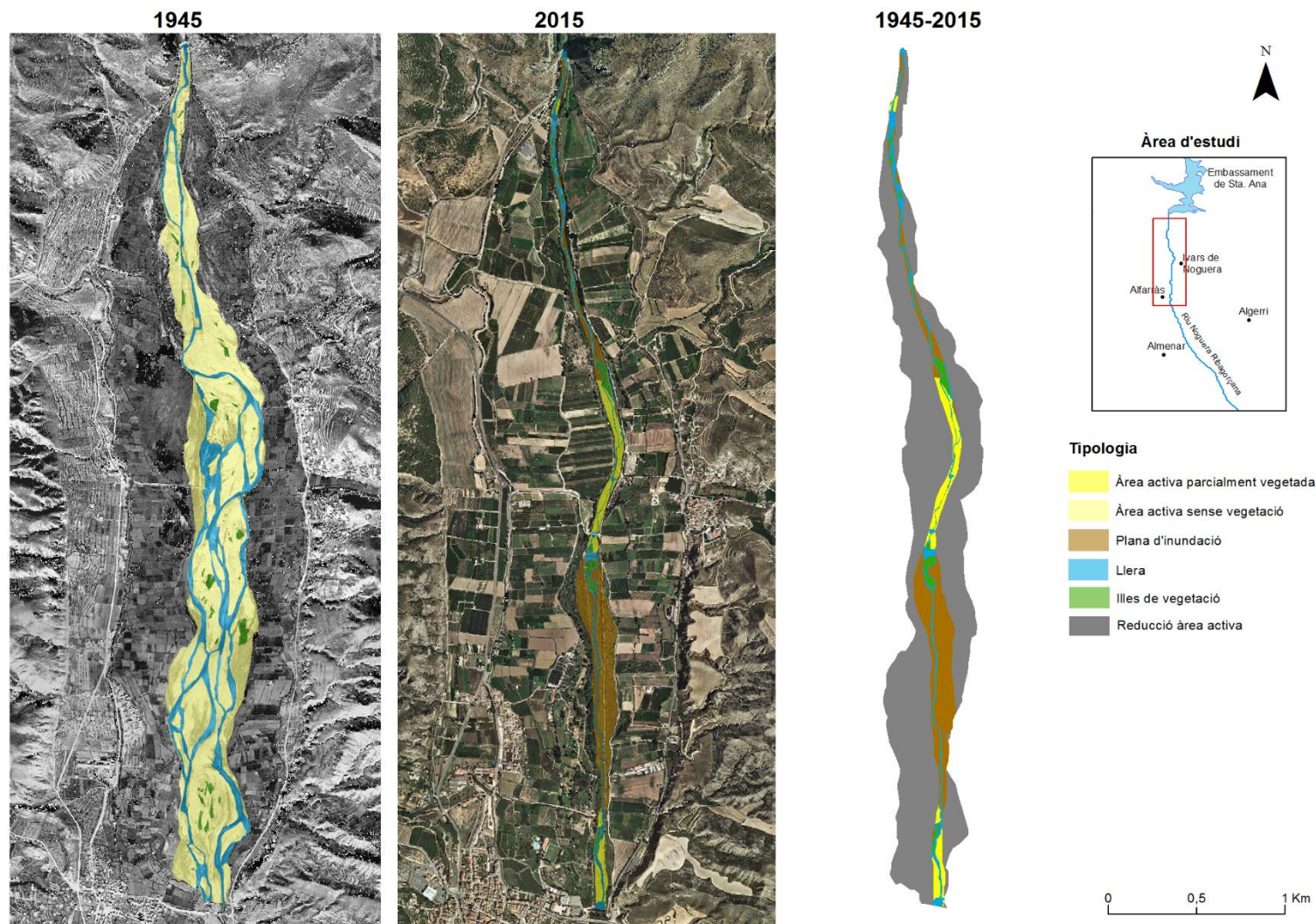


**Figura 48:** Imatge de la cartografia en planta de les unitats morfològiques identificades de l'any 2015. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC.





**Figura 49:** Evolució morfològica del conjunt del tram d'estudi al llarg del període analitzat. Font: Elaboració pròpia



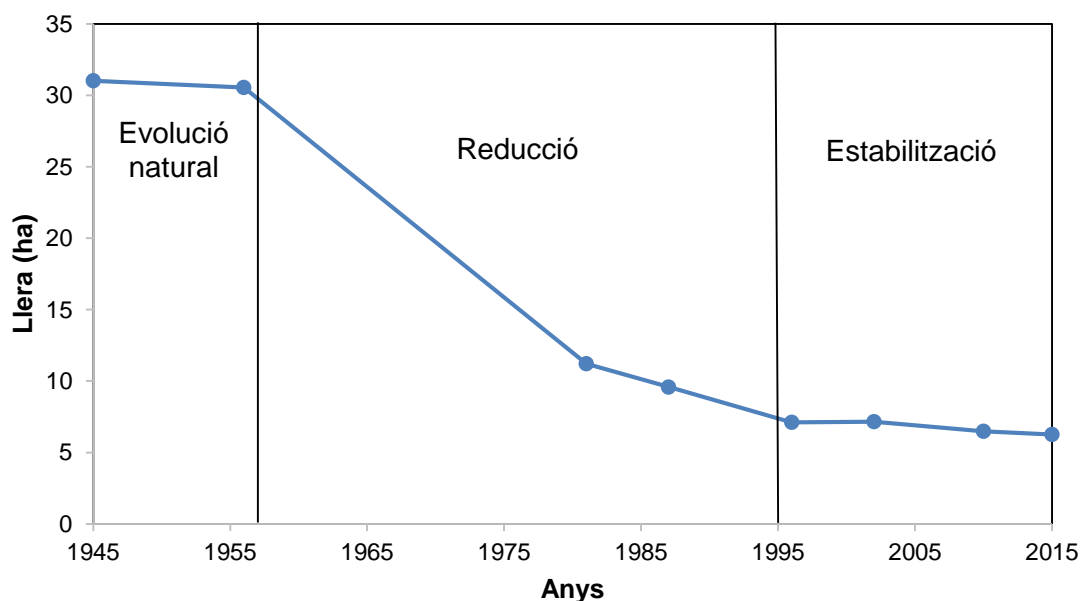
**Figura 50:** Reducció de l'àrea activa sense vegetació entre els anys 1945 i 2015. Font: Elaboració pròpia amb la base cartogràfica del ICGC.

En els següents apartats s'analitza l'evolució de cadascuna de les unitats morfològiques estudiades de manera detallat amb l'objectiu de quantificar els canvis observats durant el període d'estudi.

#### 4.2.1. Canvis en la superfície de la llera

La reducció de la superfície de la llera és un dels principals processos observats en aquest tram d'estudi. Aquest procés està directament relacionat amb l'impacte causat per la construcció de l'embassament de Santa Ana, i de manera específica associats a la reducció del cabal i de l'aportació sedimentària des d'aigües amunt. Tot i això, és important emfatitzar que aquests càlculs podrien estar influenciats per un diferent cabal circulant en el moment de l'obtenció de les fotografies aèries. Tot i això, les diferències són tan significatives que aquesta possible incertesa no modificaria els patrons observats.

Si s'observa la figura 51 podem concloure que hi ha una primera etapa (1945-1956) d'evolució natural de la llera, en què gairebé no hi ha variació important pel que fa a la reducció de la llera. Tal i com indica la taula 8, la reducció és tan sols del 1,5% respecte l'any 1945 i, segurament pot ser a causa dels processos associats a les crescudes que provoquen canvis en la mobilitat dels canals i, també per l'assut de derivació del canal de Pinyana que ja estava construït.



**Figura 51:** Canvis en la superfície de la llera. Font: Elaboració pròpia.

Després d'aquesta etapa inicial, destacar una segona etapa de regressió o reducció de la llera (1956–1996), que és caracteritzada per la reducció de la llera com a conseqüència dels efectes associats a l'embassament, el qual és va finalitzar l'any 1962. Com s'observa a la taula 8, des de l'entrada en servei de l'embassament fins a l'any 1996 la superfície de la llera s'ha reduït un 77,1%. En aquest període és on més és noten els efectes de l'embassament en la disminució de l'amplada de la llera i, per tant, la reducció de les àrees actives al llarg del tram d'estudi.

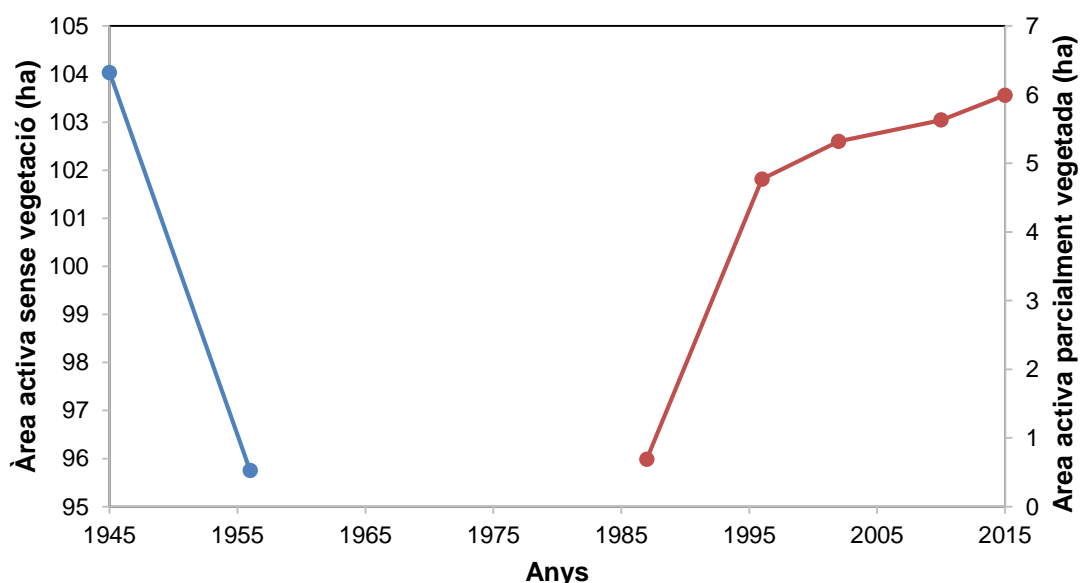
Finalment l'última etapa (1996–2015), es caracteritza per l'estabilització de la llera, ja que des de l'any 1996 fins l'any 2015 només s'ha reduït un 2,7%. Estudis com els de Vericat i Batalla (2004) i Batalla et al. (2006) al tram baix del riu Ebre, mostren com els embassaments poden reduir notablement l'amplada de la llera, que en alguns casos es redueix en un 20% en el seu tram d'estudi. El mateix estudi al riu Ebre, aigües avall del municipi de Móra d'Ebre, afirmen que s'ha reduït tant la sinuositat com l'amplada un 10% de la llera principal.

**Taula 8:** Evolució de la llera al tram baix del riu Noguera Ribagorçana. Font: Elaboració pròpia a partir de la cartografia que es presenta en les figures 41-48.

<b>Anys</b>	<b>Llera (ha)</b>	<b>% reducció</b>
1945	31	-
1956	30,6	1,5
1981	11,2	63,9
1987	9,6	69,1
1996	7,1	77,1
2002	7,2	76,9
2010	6,5	79,1
2015	6,3	79,8

#### 4.2.2. Canvis en la superfície de l'àrea activa de la llera

Els canvis en la superfície de l'àrea activa de la llera estan directament relacionats amb la reducció de freqüència i magnitud de les riudes tal i com s'ha analitzat en l'apartat anterior. Altres impactes antròpics com la construcció d'esculleres o de les motes associades al buidatge de l'any 1988 (veure Figura 10) també afavoreixen a la reducció de la superfície de l'àrea activa sense vegetació (Figura 50). De l'any 1945 al 1956 hi ha una reducció del 8% de l'àrea activa (Figura 52, Taula 9). Aquesta reducció es podria considerar negligible a causa de les possibles incerteses associades a la cartografia. En canvi, el que sí que és significatiu, és la desaparició d'aquesta tipologia després de l'any 1956 i l'aparició d'una nova unitat, categoritzada com àrea activa parcialment vegetada. Tal i com s'ha descrit en la metodologia, aquesta tipologia és caracteritzada per la presència de vegetació, en cap cas arbòria però que indica certa estabilitat respecte les condicions dels anys 50 del segle XX. Tot i que aquestes àrees s'inunden en certa freqüència, la vegetació s'estabilitza novament a posteriori. La superfície d'aquestes àrees s'ha incrementat d'1 a 6 ha en els darrers 30 anys (Taula 10). A més a més, les figures 45-49 indiquen com aquesta tipologia és més comú en les proximitats dels assuts de derivació del canal d'Algerri-Balaguer i el de la piscifactoria de Santa Ana (Figura 45-49).



**Figura 52:** Canvis en la superfície de l'àrea activa sense vegetació i en l'àrea activa parcialment vegetada. Font: Elaboració pròpia.



**Taula 9:** Evolució de l'àrea activa sense vegetació al tram baix del riu Noguera Ribagorçana. Font: Elaboració pròpia a partir de la cartografia que es presenta en les figures 41-48.

<b>Anys</b>	<b>Àrea activa sense vegetació (ha)</b>	<b>% reducció</b>
1945	104	-
1956	95,8	8,0
1981	-	-
1987	-	-
1996	-	-
2002	-	-
2010	-	-
2015	-	-

**Taula 10:** Evolució de l'àrea activa parcialment vegetada al tram baix del riu Noguera Ribagorçana. Font: Elaboració pròpia a partir de la cartografia que es presenta en les figures 41-18.

<b>Anys</b>	<b>Àrea activa parcialment vegetada (ha)</b>	<b>% augment</b>
1945	-	-
1956	-	-
1981	-	-
1987	0,69	-
1996	4,8	591
2002	5,3	11,5
2010	5,6	5,8
2015	6	6,4

En el cas de la vegetació que trobem en aquestes unitats, hi ha que destacar que s'assenta sobre les formacions sedimentàries de la llera, i al no haver-hi oscil·lacions importants de cabal o crescudes recurrents s'estabilitza a poc a poc, guanyant en extensió fins l'aparició d'un episodi competent. Aquest cas és un bon indicador per saber el grau d'estabilitat morfològica i hidrològica del riu. Per tant, quan passa aquest fet, el que augmenta és la vegetació aquàtica (macròfits<sup>15</sup>), boga o el canyís. Estudis com Tena et al. (2010) o Gonzalo et al. (2010) posen de manifest aquests problemes i proposen com a solució les crescudes de manteniment (artificials) per tal d'augmentar el trànsit de sediments, la mobilitat de la llera del riu i, per últim, l'eliminació i/o control de la vegetació aquàtica. Amb aquest mètode permetria recuperar part de la dinàmica

<sup>15</sup> Planta aquàtica o alga que viu totalment o parcialment submergida dins de l'aigua (Enciclopèdia.cat).



fluvial i, per tant, mantindrà les funcions del ecosistema i activar els processos hidro-geomorfològics.

#### **4.2.3. Canvis en la superfície de l'àrea de la plana d'inundació**

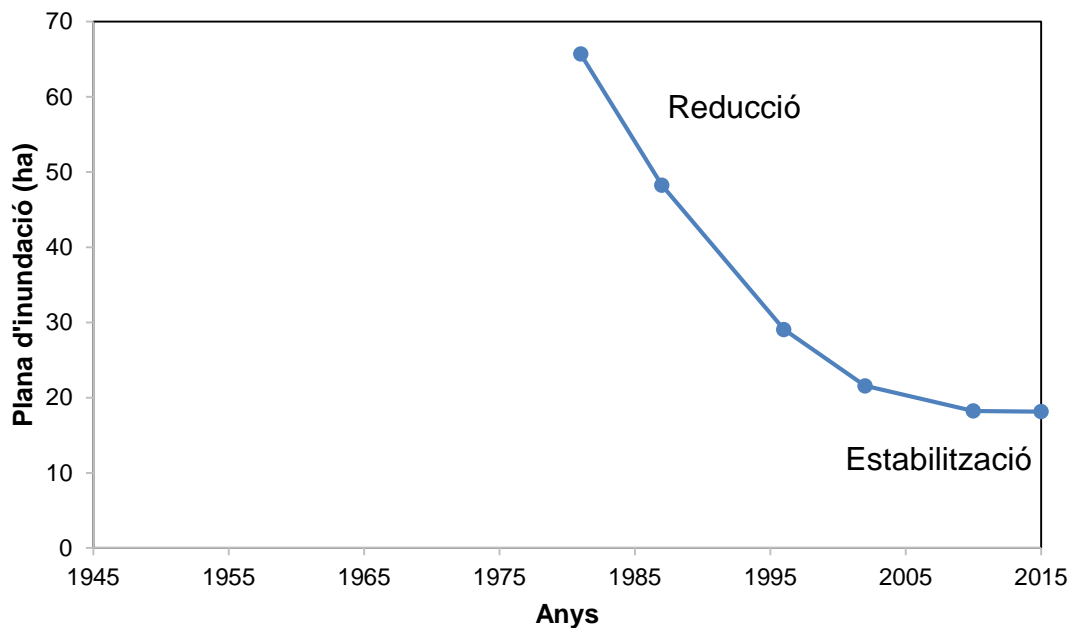
És necessari remarcar que en aquest treball ens referim a plana d'inundació a la part adjacent a la llera que està formada per sediments com graves o còdols, o vegetació que s'inunda en períodes de cabal elevat però es pot considerar estable, tan sols riuades d'elevada magnitud podrien generar canvis en l'extensió d'aquesta unitat. Així, aigües avall de les preses, es considera que es tracta de l'àrea activa de la llera que s'ha estabilitat i ha quedat desconnectada de la dinàmica contemporània. Aquesta unitat, conjuntament amb les àrees actives parcialment vegetades i l'extensió que ocupa la vegetació de ribera (no analitzada en aquest treball tal i com indiquen les limitacions) correspondria a l'àrea activa inicial abans de la construcció de la presa.

Els canvis en la plana d'inundació estan directament relacionats amb la disminució del règim de crescudes, ja que és quan el riu té més competència (capacitat d'erosionar i transportar) i aporta més sediments i, sense aquesta aportació sedimentària, aquestes àrees van estabilitzant-se i desconnectant-se de la dinàmica contemporània progressivament. Part d'aquestes àrees pot estar ocupada per la vegetació de ribera. A més a més, també s'observa que àrees antigament de plana d'inundació o activa ara són zones ocupades per activitats agrícoles. Aquest fet ens mostra com molta gent s'apodera de les àrees antigament actives per ocupar-les i cultivar-les per a fins agrícoles a causa de que la regulació fa que la inundació en aquestes sigui mínim i presenten sediments apropiats per a les pràctiques agrícoles. Aquests processos són també observats a nivell quantitatiu. La figura 53 mostra com hi ha una reducció dràstica important de l'àrea que ocupa aquesta unitat fins l'any 2000 aproximadament. Després, com a conseqüència de l'estabilitat del cabal, la reducció de les crescudes i la nul·la aportació de sediments, veiem que l'extensió que ocupa la plana d'inundació es queda establerta. Com a dada destacable s'indica que en menys de 30 anys la reducció ha estat del 72,4% (Taula 11). A mode d'exemple, Ollero et al. (2006) indiquen una reducció del 56% de la

superfície de la plana d'inundació del curs mitjà del riu Ebre entre els anys 1927 i 1998, concretament entre les localitats de Logronyo i la Zaida.

Els resultats indiquen dos fases en el procés d'estabilització i pèrdua d'unitats morfològiques:

**a)** un cop s'inicia la regulació les àrees actives del canal passen a ser més estables i, en molts casos, la desconexió topogràfica a causa dels processos d'incisió o extraccions d'àrids, fan que passin a formar part de la plana d'inundació (tal i com s'entén en aquest estudi). A posteriori, **b)** part de l'àrea de la plana d'inundació es perd a causa de la intrusió antròpica (camps de cultiu majoritàriament) i la intrusió de la vegetació de ribera, i els canvis en l'extensió d'aquesta unitat són mínims.



**Figura 53:** Canvis en la superfície de l'àrea de la plana d'inundació. Font: Elaboració pròpia.

**Taula 11:** Evolució de la plana d'inundació al tram baix del riu Noguera Ribagorçana.

Font: Elaboració pròpia a partir de la cartografia que es presenta en les figures 41-48.

Anys	Plana d'inundació (ha)	% reducció
1945	-	-
1956	-	-
1981	65,7	-
1987	48,2	26,6
1996	29	55,8
2002	21,6	67,2
2010	18,2	72,3
2015	18,1	72,4

#### 4.2.4. Reducció de la complexitat morfològica (multiplicitat)

L'índex de multiplicitat ens permeten analitzar i estudiar el grau de complexitat d'un riu tant el temps i en l'espai a partir del nombre de canals d'aigües baixes. Així és un bon indicador del dinamisme tot i que està influenciat pel cabal circulant en el moment que s'obtenen les fotografies aèries. Observant els resultats de la figura 54 s'observen dos períodes:

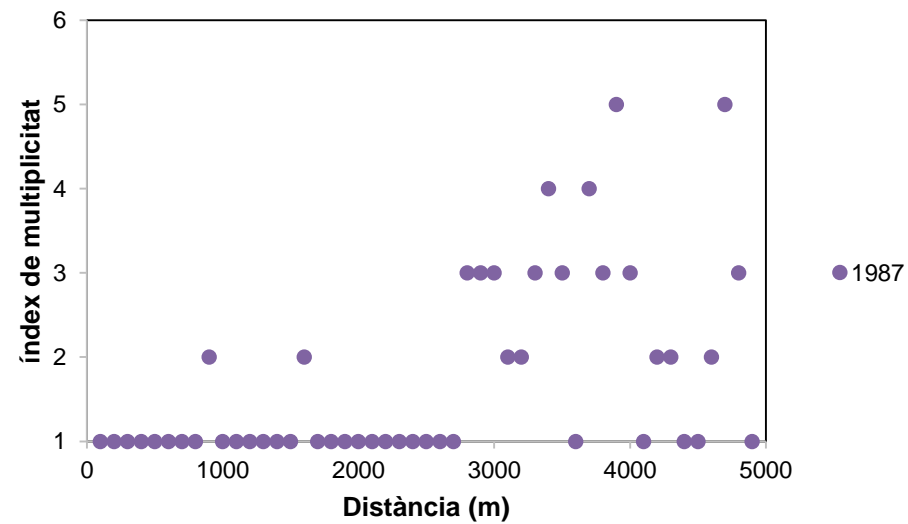
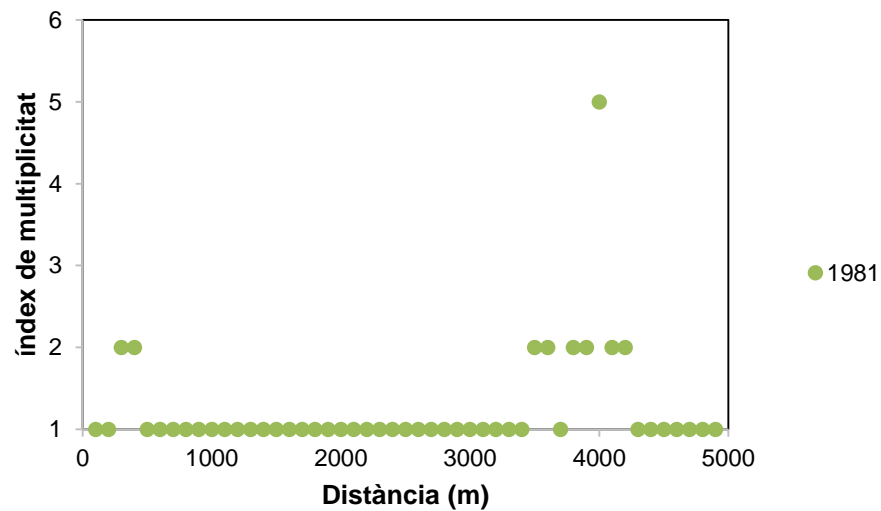
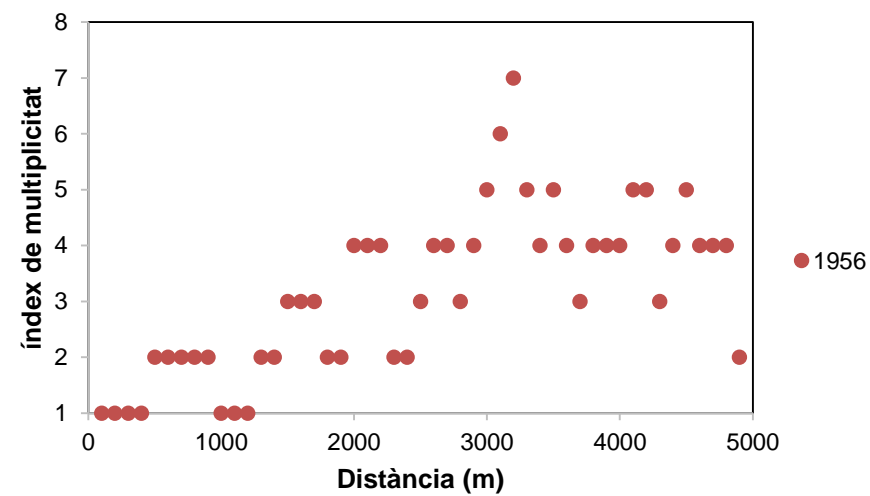
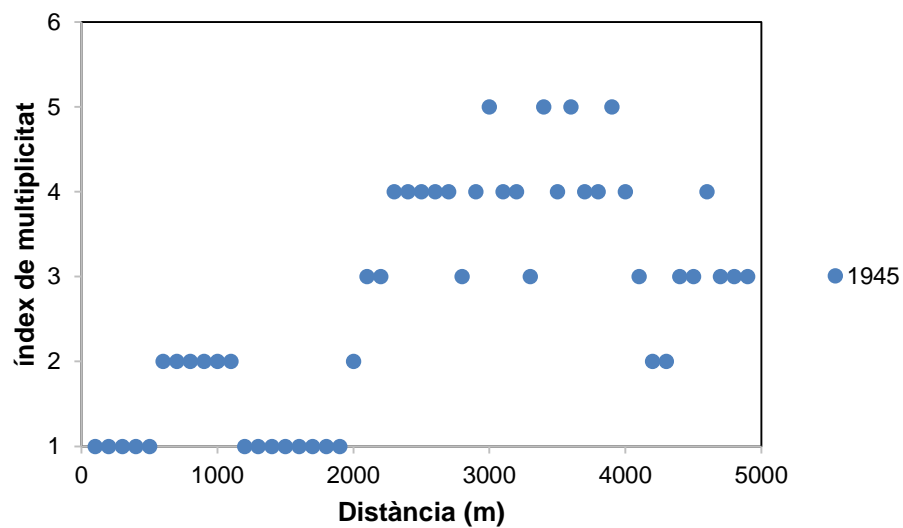
**a)** Durant el primer període, anys 1945-1987 és on hi ha els valors més elevats de multiplicitat (a l'any 1981 per problemes de resolució de la ortofoto, no s'ha pogut realitzar una correcta cartografia) i, on hi ha més variabilitat. Observem que en el primer tram fluvial és on hi ha menys canals. Es tracta d'un tram on la plana fluvial presenta menys amplada. Pel contrari, des del quilòmetre 2 aproximadament fins al final del nostre tram d'estudi, és on s'observa el major nombre de canals, ja que és on la llera del riu arriba a una major extensió i, on les crescudes, tenen majors efectes per modificar l'àrea activa, sobretot entre els anys 1945 i 1956, previs a la construcció de l'embasament.

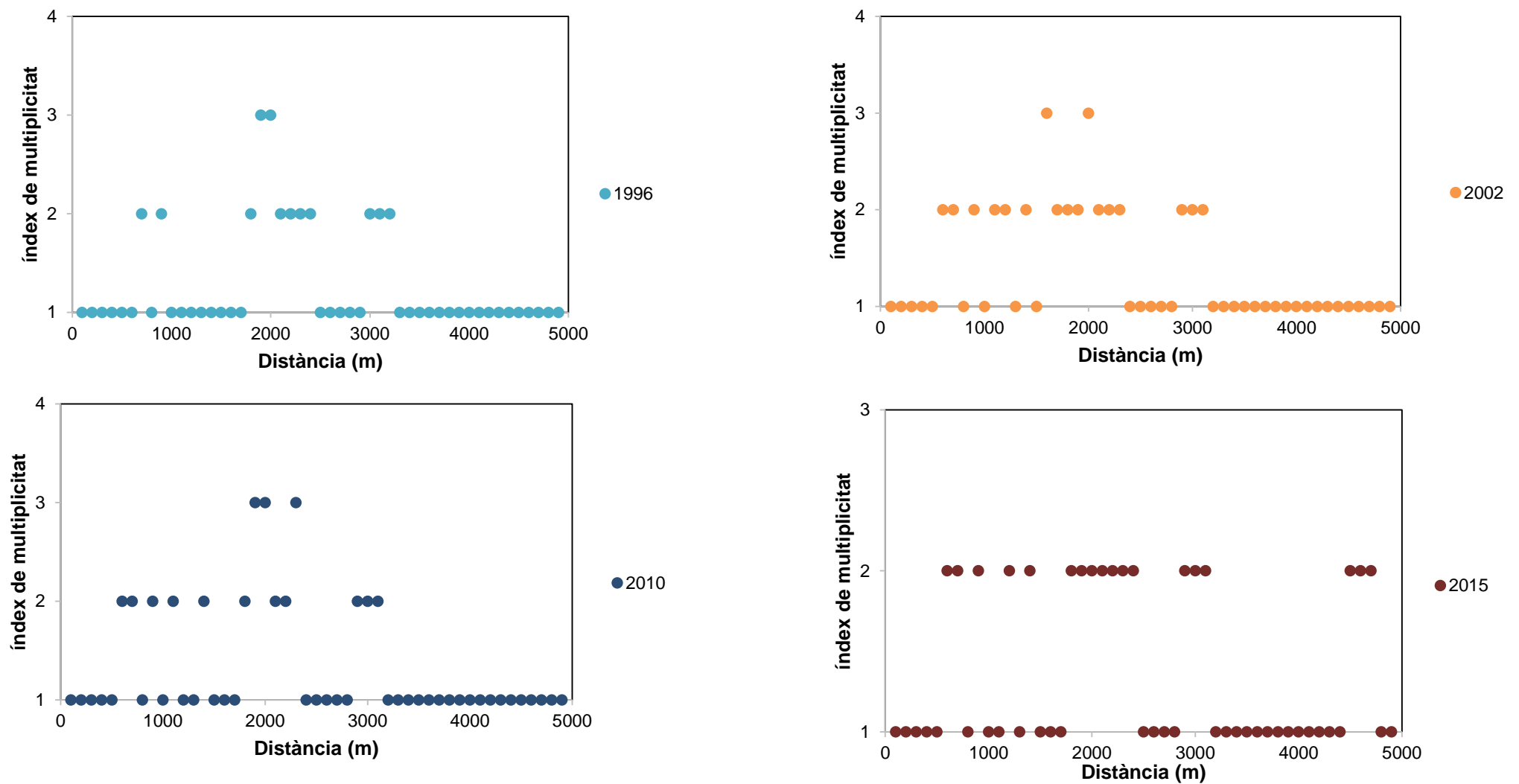
**b)** En el segon període, anys 1996-2015 (Figura 54) és on podem veure que s'ha experimentat un major descens del grau de multiplicitat del tram d'estudi, concretament del quilòmetre 2 fins al 5, a causa de la important disminució de l'amplada activa per l'efecte de l'estabilització (Figura 44) que s'ha discutit anteriorment, amb directa relació amb la construcció de l'embassament de Santa Ana aigües amunt. Amb aquests resultats podem concloure que les crescudes són un factor molt important per determinant la multiplicitat de la llera, ja que

aquestes crescudes tenen la capacitat de modificar la morfologia dels canals de llera i, a més, d'aportar nombrosos sediments. Per tant, el tram de riu analitzat, poc a poc, va modificant la seva tipologia a un canal més simplificat, i d'un únic canal, com és pot apreciar a la figura 43.

Per últim, en la figura 55 es pot veure la diferència entre l'índex de multiplicitat de l'any 1945, amb un valor màxim de cinc canals, i els valors de l'any 2015, situació contemporània on els valors són majoritàriament d'un amb un màxim de dos canals.

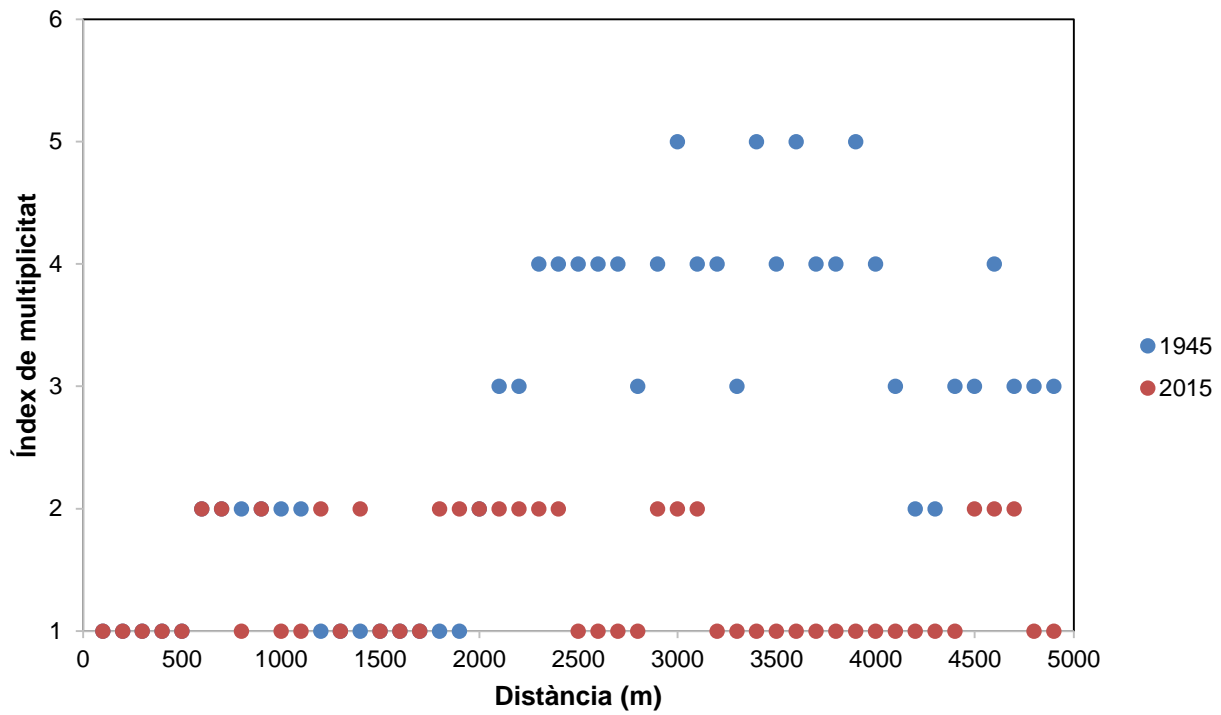
Estudis com el de Llena (2015) al riu Cinca (Oscà), ens mostren els efectes de la reducció de les crescudes i de les extraccions d'àrids sobre els índex de multiplicitat, resultats similars als obtinguts en aquets treball.





**Figura 54:** Índex de multiplicitat de canals dels anys 1945-2015. Font: Elaboració pròpia.





**Figura 55:** Comparació de l'Índex de multiplicitat de canals de l'any 1945 i 2015. Font: Elaboració pròpia.

## 5. CONCLUSIONS I RECOMANACIONS PER A TREBALLS FUTURS

Aquest treball ha mostrat i analitzat els principals canvis hidrològics i morfològics al tram baix de la Noguera Ribagorçana, com a conseqüència de la regulació de la conca.

Les conclusions d'aquest treball són:

1. A nivell metodològic, la utilització dels servidors WMS per a la realització de cartografia facilita les anàlisis històriques d'informació multi-temàtica. En el cas d'aquest estudi es destaca que amb aquests servidors ja no és necessari escanejar ni georeferenciar, ja que moltes de les imatges ja estan georeferenciades i, a més, ja no és necessari descarregar les ortofotos, les quals ocupen molt d'espai i, per tant, tot això agilitza el procés d'elaboració i anàlisi cartogràfica.
2. Els resultats de les anàlisis hidrològiques i del règim de crescudes corrobora el paper regulador que té l'embassament aigües avall, i la capacitat de reduir la magnitud i freqüència de les crescudes. De manera específica:
  - S'observa una reducció del 33% de l'aportació hídrica anual després de la construcció de l'embassament.
  - El Qci mitjà post-embassament s'ha reduït un 63% comparat en el valor mitjà pre-embassament.
  - Per realitzar una anàlisi de freqüència i magnitud és necessari seleccionar el període de temps de manera acurada i tenir en compte la longitud de la sèrie per a les interpretacions.
  - La reducció dels cabals de crescuda és més important per les crescudes d'elevada freqüència (2 anys, T2).
  - La reducció de les crescudes freqüents (T2) és del 61,8%, mentre que els períodes de retorn de 25 anys tenen una reducció del 57,3%.

**3.** Els principals canvis morfològics observats a partir de la cartografia en planta de les d'unitats morfològiques (1945-2015) en un total de 8 sèries de fotografies aèries són:

- La disminució de l'àrea que ocupa la llera és d'un 79,8% si es compara la cartografia de l'any 1945 i de l'any 2015.  
S'observa una clara reducció de l'amplada activa de la llera, sobretot a partir de l'any 1981, procés que va acompanyat per un progressiu augment de l'àrea activa parcialment vegetada i de la vegetació de ribera. Aquest últim procés és més intens, el que podria indicar el temps d'ajust del riu a la nova situació donada per l'impacte de la presa.
- A més de la pèrdua d'àrees actives, des de l'any 1981 s'ha perdut un 72,4% de la plana d'inundació a causa de la intrusió de la vegetació de ribera i antròpica.
- En general, els resultats mostren dos fases en el procés d'estabilització i pèrdua d'unitats morfològiques:
  - a)** una primera fase després de la construcció de la presa en la que les àrees actives es redueixen significativament, passen a ser més estables i, en molts casos, la desconexió topogràfica a causa dels processos d'incisió o extraccions d'àrids, fan que passin a formar part de la plana d'inundació. Posteriorment, **b)** part de l'àrea de la plana d'inundació es perd a causa de la intrusió antròpica (camps cultius majoritàriament) i la intrusió de la vegetació de ribera i els canvis en l'extensió d'aquesta unitat són mínims. Així, els resultats indiquen que la llera és més estable i menys dinàmica que en el període pre-embassament.

Els resultats obtinguts en aquest treball permeten verificar la hipòtesi inicial plantejada. Així, la construcció de l'embassament de Santa Ana, conjuntament amb la regulació general de la conca i altres impactes a escala de conca (canvis en els usos del sòl), ha reduït notablement el règim de crescudes i ha ocasionat un canvi en la morfologia de la llera aigües avall, bàsicament han desaparegut les àrees més actives de la llera i aquesta presenta un gran estabilitat morfo-sedimentària. Aquests impactes també estan relacionats amb altres activitats

antròpiques a escala de conca i a escala local (canvis usos del sòl, extraccions d'àrids).

Pel que fa a recomanacions per a futurs treballs dir que en aquest no s'ha cartografiat ni realitzat cap evolució de la dinàmica de la vegetació de ribera. En treballs futurs seria molt interessant estudiar com ha evolucionat la vegetació de ribera en aquest tram i veure com s'adapta la vegetació davant les modificacions que es produeixen en la morfologia del riu. De la mateixa manera, en aquest estudi no s'han tingut en compte els impactes de les extraccions d'àrids sobre la dinàmica morfològica. No tan sols les extraccions, sinó les activitats associades a aquestes com la construcció de motes o esculleres. Aquests aspectes seria interessant que estiguessin complementats en estudis futurs.

Per últim, també cal destacar que alguns dels resultats del nostre estudi poden tenir certa incertesa a causa de limitacions existents. Com ja s'ha pogut percebre, no tenim disponibles totes les sèries d'ortofotos històriques i, per tant, ens hem hagut d'adaptar a les ortofotos que estan publicades. Per exemple, trobem un salt entre l'any 1956 i l'any 1978 en què no hi ha cap fotografia disponible, i malauradament, la nostra àrea queda exclosa de les fotografies aèries de la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre de l'any 1927. També hem tingut limitacions a l'hora de cartografiar a causa de problemes en la resolució de la ortofoto, fet que crea dificultat a l'hora de cartografia la llera, àrea activa etc., com en el cas de la fotografia àrea de l'any 1981, que per problemes en la resolució no s'ha pogut fer una cartografia del tot acurada.

**Agraïments**

En primer lloc, vull agrair al meu tutor Damià Vericat la seva atenció, orientació i dedicació personal en l'evolució d'aquest treball. També vull donar-li les gràcies pels coneixements que m'ha transmès i per la confiança que ha depositat en mi durant l'elaboració del treball.

Al Dr. Carles Balasch, per la voluntat i la dedicació que va tenir amb mi a l'hora d'explicar-me els mètodes d'elaboració de l'estimació de cabals i els diferents procediments que hi havia per fer-ho. També vull mostrar el meu agraïment al grup de professors de Geografia Física (Drs.: Carles Balasch, Ramon J. Batalla, Josep M. Màsich i Damià Vericat) que m'han transmès els coneixements per dur a terme un Treball de Fi de Grau relacionat amb la dinàmica fluvial d'un riu. Al Dr. Antoni Palau, gràcies per facilitar-me els documents i les fotografies del buidatge de l'embassament de Santa Ana que m'han servit d'ajuda a l'hora d'elaborar el treball.

Per acabar, també donar gràcies als amics, la família i, en especial a la Beatriu, pels ànims i l'ajuda que m'han donat durant l'elaboració del treball.

Simplement, gràcies a tots.

## Bibliografia

Agència Catalana de l'Aigua., Generalitat de Catalunya., Departament de Medi Ambient i Habitatge. (2008). *La gestió i recuperació de la vegetació de ribera. Guia tècnica per a actuacions en riberes*. 176 pp.

Batalla, R.J., Gómez, C.M., Kondolf, G.M. (2004). *Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (Northeastern Spain)*. Journal of Hydrology, 290, 1-2, 117-136.

Batalla, R.J., Vericat, D., Martínez, T.I. (2006). *River-channel changes downstream from dams in the lower Ebro River*. Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. B., 143, 1-14.

Batalla, R.J., Vericat, D. (2008). *Les crescudes de manteniment a l'Ebre*. L'Aufàbiga, 7, 9-11.

Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). (2007). *Borrador del Plan Hidrológico del Rio Noguera Ribagorzana*. Versión 2.0. Ministerio de Medio Ambiente., Gobierno de Aragón., Generalitat de Catalunya. 232 pp.

Gonzalo L.E., Batalla R.J., Vericat D. (2010). *Control del exceso de macrófitos en el bajo Ebro con crecidas de mantenimiento*. Avances de la Geomorfología en España, 2008-2010. XI Reunión Nacional de Geomorfología, Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Solsona, 235-238.

Hong L.B., Davies T. R. H. (1979). *A study of stream braiding*. Geological Society of America 90 (2). 1839-1859.

Institut Cartogràfic de Catalunya., Termcat, Centre de Terminologia., Enciclopèdia Catalana. (2012). *Diccionari terminològic de sistemes d'informació geogràfica*. Barcelona.

Kondolf, G.M., (1997). *Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channel*. Environmental Management, 21, 533-551.

López Bustos, A. (1972). *Revista de obras públicas*, 3083, 191-204.



López Moreno, J.I., García Ruiz, J.M. (2003). *Influencia de los embalses sobre el régimen fluvial en los Pirineos Centrales*. Cuadernos de Investigación Geográfica, 29, 7-21.

Llena Hernando, M., (2015). *Cambios morfológicos en el Alto Cinca durante el siglo XX a partir de fotogrametría digital automatizada*. Trabajo de Fin de Máster Universitat de Lleida. Máster de Gestión de Suelos y Aguas.

Méndez, R., Molinero, F. (1993). *Geografía de España*, Ariel, Barcelona.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino., Confederación Hidrográfica del Ebro., Mastergeo (Medio ambiente, territorio y geografía, S.L.). (2010). *Aplicación del Índice Hidrogeomorfológico IHG a la cuenca del Ebro. Subcuenca del río Noguera Ribagorzana. Río Noguera Ribagorzana, Noguera de Tor y Guart*. 50, 41 pp.

Morillo, M., García de Jalón, D. (1998). *Efectos del vaciado del embalse de Barasona en las comunidades de peces fluviales*. Limnética, 14, 47-58.

Ollero Ojeda, A., Ballarín Ferrer, D., Mora Mur, D. (2006). *Cambios en el cauce y en el llano de inundación del río Ebro (Aragón) en los últimos 80 años*. Geographicalia, 50, 87-109.

Palau, A. (1990) *El buidat de l'embassament de Santa Anna (La Noguera, Lleida) i la qualitat de les aigües de subministrament de la ciutat de Lleida*. Generalitat de Catalunya. Departament de Sanitat i Seguretat Social. Delegació Territorial de Lleida. Secció de Sanejament Ambiental. 132 pp.

Palau, A. (1991). *Evaluación limnológica de los efectos de una crecida provocada desde el embalse de Santa Ana sobre el Río Noguera Ribagorzana*. Asesoría técnica medio-ambiental. 44 pp.

Palau, A. (1991). *Evaluación limnológica de la recuperación y estado actual del Río Noguera Ribagorzana aguas abajo de la presa de Santa Ana después del vaciado del embalse*. Asesoría técnica medio-ambiental. 50 pp.

Palau, A. (1995) *Evaluación de efectos medioambientales del Proyecto de vaciado del Embalse de Barasona (rio Ésera, Huesca)*. Confederación Hidrológica del Ebro. Zaragoza. 27 pp.

Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E., Stromberg, R.C (1997). *The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration*. *Bioscience*. 47, 11, 769-784.

Rust, B.R (1978). *A classification of alluvial channel systems*. A. D. Miall (Ed). *Fluvial Sedimentology*, Calgary, Canadian Society Petroleum Geologists, 859 pp., 187–198 pp.

Schumm, S.A. (1963). *A tentative classification of alluvial river channel*. U. S. Geological Survey circular. 477, 9 pp.

Schumm, S.A. (1977). *The fluvial System*. Ed. Wiley. New York. 338 pp.

Tena, A., Singer, M., Batalla, R.J., (2010). *El uso de FLUVIAL-12 para el rediseño y la evaluación de crecidas de mantenimiento en el bajo Ebro*. Avances de la Geomorfología en España, 2008-2010. XI Reunión Nacional de Geomorfología, Centre Tecnològic Forestal de Catalunya, Solsona, 289-292.

Termcat, Centre de Terminologia. (2003). *Diccionari de geografia física*. Barcelona.

Tuset, J., Vericat, D., Batalla, R.J. (2015). *Evolución morfo-sedimentaria del tramo medio del río Segre*. Cuadernos de Investigación Geográfica, 41,1, 23-62.

Vericat, D., Batalla, R.J. (2004). *Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro*. Revista de Cuaternario y Geomorfología, 18, 1-2, 37-50.

Vericat, D., Batalla, R.J. (2006). *Balance de sedimentos en el tramo bajo del Ebro*. Revista de Cuaternario y Geomorfología, 20, 1-2, 79-90.

Williams, G.P., Wolman, M.G. (1984). *Downstream Effects of Dams on Alluvial Rivers*. Geological Survey Professional Paper, 1286, 83 pp.

**Altres fonts d'informació**

Centro de descargas. Centro Nacional de Información Geográfica. (Consultat: 26 d'octubre de 2016). Disponible a:

(<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>)

Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. (Consultat: 10 de noviembre de 2016). Disponible a:

(<http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/afo/estaf-datos.asp?indroea=9097>)

Confederación Hidrográfica del Ebro (CHEbro). (Consultat: Disponible a:

(<http://www.chebro.es/>)

Diccionari de la llengua catalana. Institut d'Estudis Catalans. (Consultat: 4 de maig de 2017). Disponible a: (<http://dlc.iec.cat/>)

Enciclopèdia.cat. El cercador de referència en català. (Consultat: 4 de maig de 2017). Disponible a: (<http://www.enciclopedia.cat/>)

Geo Portal SIT Ebro – Confederación Hidrográfica del Ebro. (Descargas).

(Consultat: 10 de febrero de 2017). Disponible a:

(<http://iber.chebro.es/geoportat/>)

Institució Catalana d'Història Natural – Institut d'Estudis Catalans. (Consultat: 23 de maig de 2017). Disponible a: (<http://ichn.iec.cat/>)

Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. Vissir. (Consultat: 20 de març de 2017). Disponible a: (<http://www.icc.cat/vissir3>)

Inventario de Presas y Embalses. (Consultat: 14 d'abril de 2017). Disponible a: (<http://sig.mapama.es/snczi/>)

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA). (Consultat: 18 de març de 2017). Disponible a:

(<http://www.mapama.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/>)

Redes de Seguimiento del Estado e Información Hidrológica. (Consultat: 10 de novembre de 2016). Disponible a:

(<http://sig.mapama.es/redes-seguimiento/visor.html?herramienta=Aforos>)

Sistema Automático de Información Hidrológica de la Cuenca Hidrográfica del Ebro (SAIH Ebro). (Consultat: 17 de febrer de 2017). Disponible a:

(<http://www.saihebro.com/saihebro/index.php>)